

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR TEKNOLOJİLER, MALZEME SİSTEMLERİ VE UYGULAMALI ANALİZLER

EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL



İKSAD
Publishing House

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR TEKNOLOJİLER, MALZEME SİSTEMLERİ VE UYGULAMALI ANALİZLER

EDİTÖR

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL

YAZARLAR

Prof. Dr. Bülent ERDEM

Prof. Dr. Soner ÇELEN

Prof. Dr. Uğur AKYOL

Prof. Zehra PINAR İZGİ

Doç. Dr. Erkan BAHÇE

Doç. Dr. Furkan DİNÇER

Doç. Dr. Hüseyin KOÇAK

Doç. Dr. Nevin ÇANKAYA

Dr. Öğr. Üyesi Fatma Nur KAYA SAĞLAM

Dr. Öğr. Üyesi Halil Nusret BULUŞ

Dr. Öğr. Üyesi Niyazi Erdem DELİKANLI

Dr. Öğr. Üyesi Zekeriya DURAN

Öğr. Gör. Mustafa Ercan GÜNDÜZ

PhD Özgün Ceren AKBAY

Esra GÜZEL KARABULUT

Yaşasın ÖĞEN



Copyright © 2026 by iksad publishing house
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed
or transmitted in any form or by
any means, including photocopying, recording or other electronic or
mechanical methods, without the prior written permission of the publisher,
except in the case of
brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial
uses permitted by copyright law. Institution of Economic Development and
Social

Researches Publications®
(The Licence Number of Publicator: 2014/31220)
TÜRKİYE TR: +90 342 606 06 75
USA: +1 631 685 0 853
E mail: iksadyayinevi@gmail.com
www.iksadyayinevi.com

It is responsibility of the author to abide by the publishing ethics rules.
Iksad Publications – 2026©

ISBN: 978-625-378-678-6
Cover Design: İbrahim KAYA
June / 2026
Ankara / Türkiye
Size: 16x24cm

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....1

BÖLÜM 1

**YEKA GES-2024 YARIŞMASI KAPSAMINDA 40 MWe / 60 MWp
KURULU GÜCE SAHİP BİR GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN
TEKNİK VE EKONOMİK FİZİBİLİTE ANALİZİ**

Doç. Dr. Furkan DİNÇER.....5

BÖLÜM 2

**FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE İNVERTÖR
KONFIGÜRASYONU VE PERFORMANS ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Furkan DİNÇER.....23

BÖLÜM 3

**TEKSTİL VE DERİ SEKTÖRÜNDE BİYOPOLİMER
KULLANIMI: AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI**

Doç. Dr. Nevin ÇANKAYA

Yaşasın ÖĞEN.....43

BÖLÜM 4

**EKOLOJİK AÇIDAN KÖMÜR MADENCİLİĞİ: ZONGULDAK
HAVZASI VAKA İNCELEMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi Niyazi Erdem DELİKANLI

Esra GÜZEL KARABULUT.....79

BÖLÜM 5

**İPLİK BOBİNİ KURUTMA SİSTEMLERİNDE HAZNE VE
SEPARATÖR ÇIKIŞ SICAKLIKLARININ ÇOK KATMANLI
ALGILAYICI (MLP) İLE MODELLENMESİ**

Prof. Dr. Uğur AKYOL

Dr. Öğr. Üyesi Halil Nusret BULUŞ

Prof. Dr. Soner ÇELEN.....103

BÖLÜM 6

MADENLERDEKİ PATLATMA UYGULAMALARINDA USBM 8 MİLİSANİYE GECİKME KURALI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Dr. Öğr. Üyesi Zekeriya DURAN

Prof. Dr. Bülent ERDEM.....123

CHAPTER 7

CONSTRUCTION OF TRAVELLING WAVE SOLUTIONS FOR THE SCHRÖDINGER-TYPE EQUATIONS

Asst. Prof. Fatma Nur KAYA SAĞLAM

Prof. Zehra PINAR İZGİ

Assoc. Prof. Hüseyin KOÇAK.....149

CHAPTER 8

SURFACE FUNCTIONALIZATION OF 3D-PRINTED LATTICE SCAFFOLDS VIA CHITOSAN COATING: PROCESSING, MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION, AND COMPOSITIONAL ANALYSIS

PhD Özgün Ceren AKBAY

Lecturer Mustafa Ercan GÜNDÜZ

Assoc. Prof. Dr. Erkan BAHÇE.....183

ÖNSÖZ

Günümüz mühendislik ve fen bilimleri, yalnızca kuramsal bilgiyi üretmekle sınırlı kalmamakta; enerji dönüşümü, sürdürülebilir üretim, çevresel etkilerin azaltılması, ileri malzeme sistemlerinin geliştirilmesi, yapay zekâ destekli modelleme, endüstriyel süreç optimizasyonu ve matematiksel analiz gibi çok katmanlı sorunlara çözüm aramaktadır. Bu kitap, söz konusu geniş bilimsel alanı tek bir ortak çerçevede buluşturan disiplinler arası bir derleme niteliği taşımaktadır. Kitapta yer alan bölümler; yenilenebilir enerji sistemlerinden madencilik uygulamalarına, biyopolimer teknolojilerinden tekstil proseslerine, yüzey mühendisliği ve biyomalzeme uygulamalarından patlatma titreşim analizlerine ve doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin analitik çözümlerine kadar uzanan geniş bir akademik yelpazeyi kapsamaktadır.

Bu yönüyle kitap, klasik anlamda tek bir dar uzmanlık alanına sıkışmayan; aksine mühendislik ve fen bilimlerinin güncel problemlerini sürdürülebilirlik, modelleme, teknik analiz ve uygulamalı çözüm üretme ortak paydasında bir araya getiren bütüncül bir çalışma olarak tasarlanmıştır. Bölümlerin konu çeşitliliği ilk bakışta geniş görünse de, kitabın bütünlüğü; her bir çalışmanın belirli bir teknik problemi tanımlaması, bu problemi bilimsel yöntemlerle incelemesi ve uygulamaya dönük sonuçlar üretmesi üzerinden sağlanmaktadır.

Kitapta hem Türkçe hem de İngilizce bölümlere yer verilmiştir. Bu tercih, editöryal açıdan bilinçli ve işlevsel bir yaklaşımdır. Türkçe bölümler, özellikle ulusal mühendislik uygulamalarına, yerel sektör dinamiklerine ve Türkiye bağlamındaki teknik değerlendirmelere katkı sunarken; İngilizce bölüm, matematiksel fizik alanında uluslararası literatürle doğrudan etkileşim sağlayabilecek niteliktedir. Bu çok dilli yapı, kitabın bütünlüğünü zayıflatan bir unsur olmaktan ziyade akademik çeşitliliğini artıran bir özellik olarak değerlendirilmelidir.

Kitabın ilk bölümünde yer alan güneş enerjisi santraline yönelik teknik ve ekonomik fizibilite çalışması, yenilenebilir enerji yatırımlarının yalnızca mühendislik tasarımı açısından değil, ekonomik sürdürülebilirlik boyutuyla birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bunu izleyen fotovoltaiik sistem odaklı çalışmada ise invertör konfigürasyonlarının sistem performansına

etkileri ele alınarak saha verilerine dayalı kapsamlı bir değerlendirme sunulmaktadır.

Biyopolimerlerin tekstil ve deri sektörlerindeki kullanımını ele alan bölüm, sürdürülebilir malzeme teknolojileri perspektifini güçlendirirken; Zonguldak Havzası örneğinde kömür madenciliğinin çevresel etkilerini inceleyen çalışma, enerji üretimi ve çevresel sorumluluk arasındaki dengeyi tartışmaya açmaktadır.

Endüstriyel süreçlere yönelik olarak hazırlanan çalışmada, iplik bobini kurutma sistemlerinin çok katmanlı algılayıcı (MLP) modeli ile analiz edilmesi, yapay zekâ tabanlı modelleme yöntemlerinin üretim süreçlerine entegrasyonunu ortaya koymaktadır. Patlatma mühendisliği bağlamında ele alınan bir diğer bölümde ise uzun yıllardır kullanılan 8 milisaniye gecikme kuralı, modern ölçüm teknikleri ve fiziksel modelleme yaklaşımları ışığında yeniden değerlendirilmektedir.

Kitapta yer alan yüzey mühendisliği ve biyomalzeme odaklı çalışma, MSLA yöntemi ile üretilmiş üç boyutlu kafes yapıların kitosan kaplama ile fonksiyonelleştirilmesini ele almakta; bu yapıların morfolojik ve elementel özellikleri üzerinden yüzey karakteristiğinin biyomalzeme performansı üzerindeki etkisini incelemektedir. Bu bölüm, kitabın “malzeme sistemleri” eksenini güçlendirerek uygulamalı biyomalzeme araştırmalarına önemli bir katkı sunmaktadır.

Matematiksel fizik alanına odaklanan İngilizce bölüm ise Schrödinger-tipi doğrusal olmayan diferansiyel denklemler için gezici dalga çözümlerinin elde edilmesini konu almakta ve kitabın kuramsal yönünü tamamlayan önemli bir bilimsel çerçeve sunmaktadır.

Bu kitapta yer alan çalışmaların ortak özelliği, mühendislik ve fen bilimlerinde karşılaşılan problemlere betimleyici değil; **analitik, model temelli ve çözüm odaklı** yaklaşımlar sunmalarıdır. Enerji sistemlerinden malzeme teknolojilerine, üretim süreçlerinden matematiksel modellere kadar uzanan bu geniş kapsam, günümüz araştırma eğilimlerini bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır.

Editöryal açıdan bu derlemenin temel yaklaşımı, farklı disiplinleri ortak bir bilimsel sorumluluk alanında buluşturmadır: daha verimli sistemler geliştirmek, çevresel etkileri azaltmak, veriye dayalı kararlar üretmek ve bilimsel olarak doğrulanabilir çözümler ortaya koymak. Bu bağlamda kitap;

araştırmacılar, lisansüstü öğrenciler, mühendisler ve disiplinler arası çalışmalara ilgi duyan akademisyenler için önemli bir başvuru kaynağı olma potansiyeline sahiptir.

Kitabın hazırlanmasına katkı sunan tüm bölüm yazarlarına teşekkür ederim. Ayrıca bu eserin yayımlanma sürecinde akademik yayıncılığa sunduğu katkılar ve editöryal destekleri dolayısıyla İKSAD Yayınevi'ne teşekkür ederim.

Bu kitapta yer alan her bölüm, ilgili bölüm yazarlarının bilimsel çalışmaları doğrultusunda hazırlanmıştır. Bölümlerde sunulan tüm bilgi, veri, tablo, şekil, yorum ve sonuçlar ilgili bölüm yazarlarının sorumluluğundadır. Kitapta ifade edilen görüşler, aksi açıkça belirtilmedikçe editörün veya İKSAD Yayınevi'nin kurumsal görüşünü yansıtmaz.

Editör ve yayınevi, bilimsel içeriklerin doğruluğu, kullanılan verilerin güvenilirliği, kaynakların uygunluğu ve yayın etiğine ilişkin sorumluluğun ilgili bölüm yazarlarına ait olduğunu kabul eder. Bu yönüyle eser, farklı disiplinlerden araştırmacıların katkılarını bir araya getiren akademik bir derleme niteliği taşımaktadır.

Bu eserin mühendislik ve fen bilimleri alanındaki çalışmalara katkı sağlamasını temenni eder, emeği geçen tüm yazarlara ve İKSAD Yayınevi'ne teşekkür ederim.

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Serkan GÜLDAL
Adıyaman Üniversitesi

BÖLÜM 1

YEKA GES-2024 YARIŞMASI KAPSAMINDA 40 MWe / 60 MW_p KURULU GÜCE SAHİP BİR GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN TEKNİK VE EKONOMİK FİZİBİLİTE ANALİZİ

Doç. Dr. Furkan DİNÇER¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.21206932>

¹ Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Kahramanmaraş Sutcu Imam University, 0000-0001-6787-0850
furkandincer@ksu.edu.tr

1. GİRİŞ

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (“Bakanlık”), 04 Kasım 2024 tarihli ve 32712 sayılı Resmi Gazete’de ‘Güneş Enerjisine Dayalı Yenilenebilir Kaynak Alanları ve Bağlantı Kapasitelerinin Tahsisine İlişkin Yarışma’ (“YEKA GES – 2024 Yarışması/ları”) ilanını yayımlamıştır [1]. Bakanlık, YEKA GES – 2024 Yarışmaları’na ilişkin şartname (“Şartname”) ile sözleşme taslağını (“Sözleşme”) da aynı tarihte internet sitesinde yayımlamıştır [2].

YEKA GES-2024 Yarışmaları, 09 Ekim 2016 tarihli ve 29852 sayılı Resmî Gazete’de yayımlanmış olan Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları Yönetmeliği uyarınca düzenlenmekte olup bu yarışmalar, Konya, Antalya, Karaman, Malatya, Van ve Kütahya’daki toplam 800 MWe gücünde bağlantı kapasitesinin tahsisini sağlamak ve ilgili alanların kullanım hakkının 49 yıl süreyle tahsisi amacıyla gerçekleştirilecek 6 (altı) adet güneş enerjisi yarışmasını kapsamaktadır. Tablo 1’de yarışmaya tabii santraller ve bağlantı kapasite güç değerleri sunulmuştur.

Tablo 1. Yarışmaya Tabii Santraller ve Bağlantı Kapasite Güç Değerleri [1]

Sıra No	Yarışma Adı	Bağlantı Kapasitesi (MWe)
1	G24-Karapınar GES	385
2	G24-Karaman GES	200
3	G24-Malatya GES	75
4	G24-Van GES	60
5	G24-Antalya GES	40
6	G24-Kütahya GES	40

Şartnamede belirtildiği üzere [3], YEKA GES-2024 yarışma süreci 5,50 ABD Doları-cent/kWh tavan fiyat ile 3,25 ABD Doları-cent/kWh taban fiyat aralığında, katılımcıların kapalı zarf usulüyle sundukları mali teklifler ile başlamaktadır. Tekliflerin virgülden sonra iki ondalık basamak içerecek şekilde hazırlanması zorunlu olup, ilk aşamada sunulan teklifler değerlendirilmekte ve en düşük fiyatı veren beş istekli arasında açık eksiltme aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada fiyatlar aşağı yönlü olarak rekabetçi şekilde düşürülmekte ve tekliflerin taban fiyat seviyesine ya da altına ulaşması halinde yarışma sonlandırılmaktadır. Yine şartnamede ifade edildiği üzere, taban fiyatın birden fazla katılımcı tarafından teklif edilmesi durumunda ikinci

sıradaki yarışmacı, kurulu güç başına en az 10.000 ABD Doları katkı payı ödemeyi kabul etmiş sayılmaktadır. Bu durumda süreç, katkı payı üzerinden açık artırma şeklinde devam etmekte ve katılımcılar MW başına teklif ettikleri katkı payını artırarak yarışmaktadır. En yüksek katkı payının sunulması ile birlikte yarışma tamamlanmakta ve kazanan belirlenmektedir. Tablo 2’de yarışmaya ait alım fiyat ve durum bilgileri sunulmuştur.

Tablo 2. Yarışmaya Ait Alım Fiyat ve Durum Bilgileri [3]

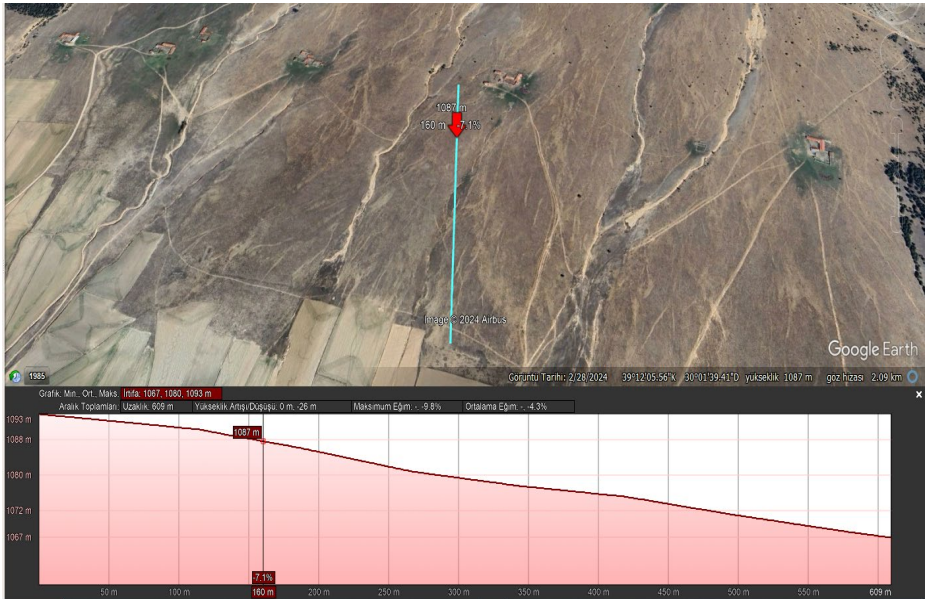
Koşul	Detaylar
Başlangıç Tavan Fiyatı	5,50 ABD Doları-cent/kWh
Başlangıç Taban Fiyatı	3,25 ABD Doları-cent/kWh
Katkı Payı Artırımı Başlangıç Tutarı	10.000 ABD Doları / MW
Serbest Piyasada Satış Süresi	Sözleşme imza tarihinden itibaren 60 ay
Elektrik Alım Süresi	Serbest piyasada satış süresi bitiminden itibaren 20 yıl

Şartnameye göre [3], güneş enerjisi santrallerinde kullanılacak ekipmanlar için belirli asgari yerlilik oranlarının sağlanması zorunludur. Bu kapsamda, özellikle güneş modüllerinin en az %75 yerli katkı oranına sahip olması ve Türkiye’de kurulu üretim tesislerinde (serbest bölgeler hariç) üretilmesi veya yurt içinden temin edilmesi gerekmektedir. Ayrıca, modül üretiminde kullanılan güneş hücrelerinin de yerli üretim şartını karşılaması ve en az ham wafer aşamasından sonraki üretim süreçlerinin Türkiye’de gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Doğru akım (DC) kabloları, taşıyıcı sistemler ve invertörler için ise %51 seviyesinde asgari yerlilik oranı öngörülmektedir. Ayrıca, ilgili ekipmanlara ait Yerli Malı Belgeleri ile tedarik anlaşmalarının lisans başvurusu öncesinde sunulması zorunlu olup, bu belgeler yetkili kurum tarafından detaylı şekilde incelenmektedir. Yerlilik şartlarının sağlanması lisans sürecinin temel unsurlarından biri olup, bu koşulların yerine getirilmemesi halinde sözleşmesel yaptırımlar uygulanmaktadır.

Arazi topografik yapısı Şekil 1 için incelendiğinde, yüzeyin genel olarak güneybatı yönüne doğru eğim gösterdiği anlaşılmaktadır. Eğim profili boyunca yaklaşık 609 m’lik mesafede kot değerlerinin 1093 m’den 1067 m seviyesine

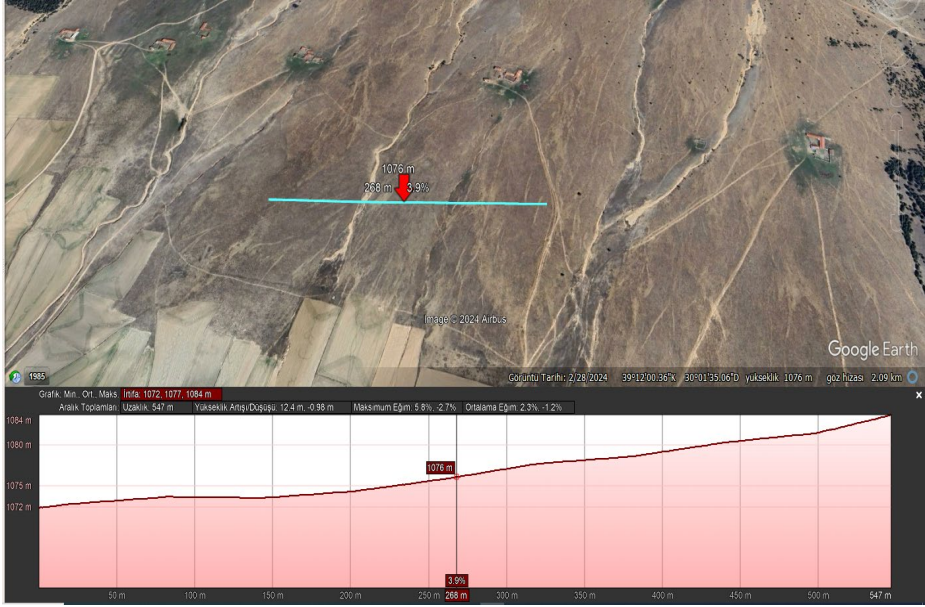
kadar azaldığı ve ortalama eğimin yaklaşık %4,3 mertebesinde olduğu görülmektedir. Maksimum eğim değerinin ise yaklaşık %9,8 seviyelerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Buna göre arazi, düzenli ve tek yönlü bir eğim karakteristiğine sahip olarak görülmektedir. Özellikle, güneş paneli yerleşimleri açısından avantajlı bir topografik yapı sunmaktadır. Güneybatı yönlü eğim, güneş ışınımından faydalanma potansiyelini artıracı bir yönlenme sağlarken, aynı zamanda yüzey drenajının doğal akış doğrultusunda gerçekleşmesine imkân tanımaktadır.



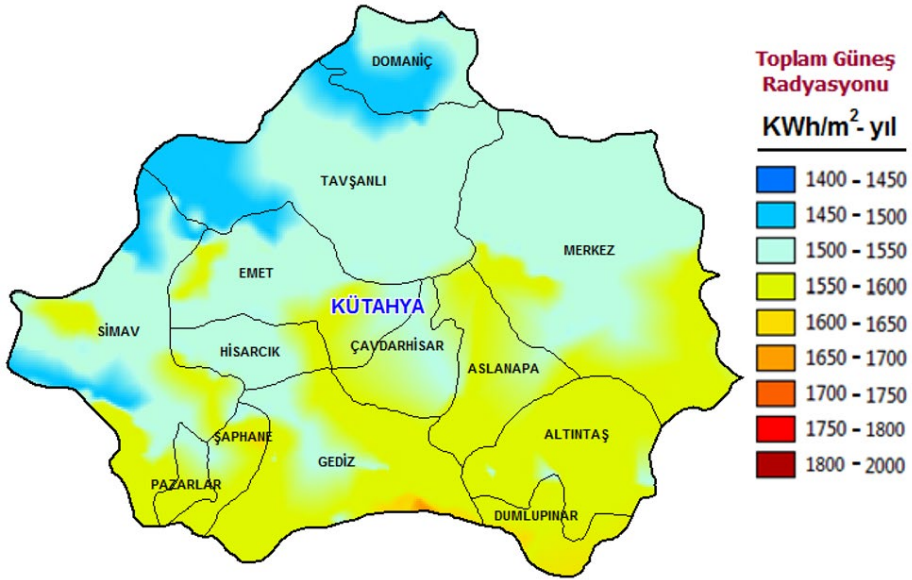
Şekil 1. Arazi Topografik Yapısı-1 [4]

Arazi topografik yapısı Şekil 2 için incelendiğinde, yüzeyin genel olarak güneybatı yönüne doğru eğimli bir karakter sergilediğini ortaya koymaktadır. Belirlenen kesitte yaklaşık 547 m uzunluk boyunca kot değerlerinin 1072 m ile 1084 m arasında değiştiği ve toplamda yaklaşık 12 m’lik bir yükselti farkı olduğu görülmüştür. Ortalama eğim değerinin yaklaşık %2–3 bandında olması, arazinin düşük eğimli ve nispeten düzgün bir morfolojiye sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Arazi Topografik Yapısı-2 [4]

Şekil 3'te Kütahya ili ve ilçelerine ait güneş enerjisi potansiyeli atlası sunulmuştur. Toplam güneş radyasyonu değerlerinin bölgesel olarak önemli farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Haritaya göre ilin kuzey ve kuzeybatı kesimlerinde (özellikle Domaniç, Tavşanlı ve Simav çevreleri) yıllık toplam güneş radyasyonu değerleri 1400–1550 kWh/m²-yıl aralığında kalmakta olup, bu bölgeler görece daha düşük güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Bu durum, söz konusu alanların daha yüksek rakım, topoğrafik gölgelenme ve yerel iklim koşulları ile ilişkili olabilir. Buna karşılık ilin güney, güneydoğu ve kısmen merkez ilçelerinde (Altıntaş, Aslanapa, Gediz ve Dumlupınar çevreleri) güneş radyasyonu değerlerinin 1550–1700 kWh/m²-yıl aralığına yükseldiği ve yer yer daha yüksek değerlere yaklaştığı gözlemlenmektedir. Planlanan çalışma da Aslanapa ilçe sınırları içerisinde kalmaktadır.



Şekil 3. Kütahya İli ve İlçelerine Ait Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası [5]

2. KURULUM MALİYETİ

Planlanan tesisin kurulu gücü 60 MWp DC ve 40 MWe AC olarak öngörülmekte olup, sistemde ayrıca 5 MWh kapasiteli bir enerji depolama ünitesi yer almaktadır.

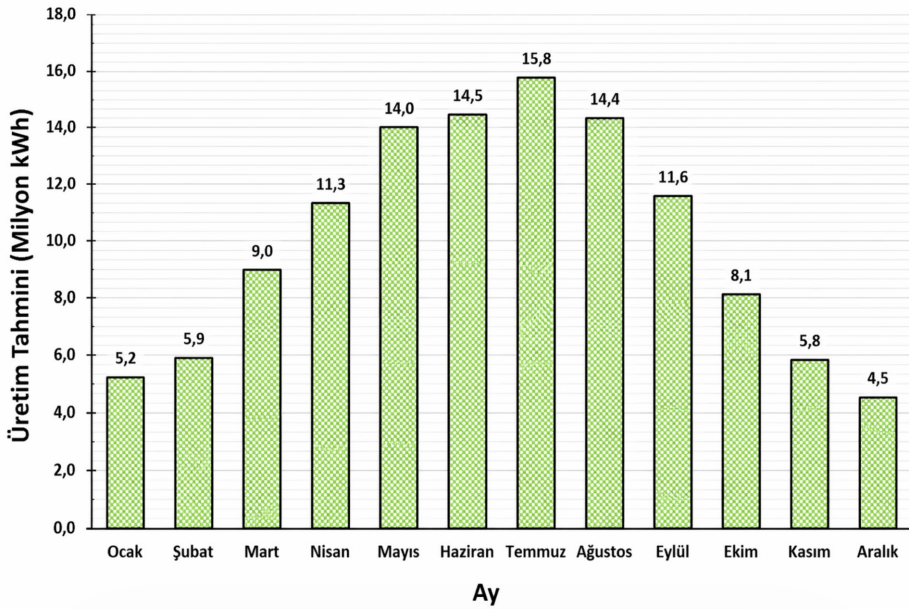
Tablo 3'te 40 MWe / 60 MWp güneş enerjisi santrali için detaylı yatırım maliyet dağılımı ve birim güç başına maliyet analizi sunulmuştur. Tablo incelendiğinde, toplam yatırım maliyetinin 35,23 milyon USD seviyesinde gerçekleştiği ve birim kurulu güç başına maliyetin yaklaşık 0,587 USD/Wp olduğu görülmektedir. Maliyet kalemleri incelendiğinde, yatırımın büyük ölçüde ana ekipman ve sistem altyapısından oluştuğu görülmektedir. En yüksek maliyet payını yaklaşık 13,2 milyon USD ile güneş panelleri oluşturmakta olup, bunu sırasıyla tek eksenli taşıyıcı sistemler (6,3 milyon USD) ve indirici merkez (4 milyon USD) izlemektedir. Bu üç kalem, toplam yatırımın büyük bölümünü oluşturmaktadır.

Tablo 3. 40 MWe / 60 MWp Güneş Enerjisi Santrali için Detaylı Yatırım Maliyet Dağılımı ve Birim Güç Başına Maliyet Analizi

Malzeme	Özellik	Birim		Birim Fiyat (USD)	Fiyat (USD)
Yarışma Bedeli		40	MWh	40.000	1.600.000
Güneş Paneli	550 W	60.000.000	W	0,22	13.200.000
İnverter-Yerli	330 kW Huawei	122	adet	6.000	732.000
Tek Eksen Taşıyıcı Sistem	Güneş Takip Sistemi	60.000.000	W	0,105	6.300.000
Depolama	1 MWh	5	MWh	210000	1.050.000
DC Kablo	6 mm2	800.000	m	0,6	480.000
Pano		40	MW	15.000	600.000
AC Kablo	3x240+1 20 mm2 NAYY	10.000	m	10	100.000
Hücreler		8	adet	100.000	800.000
Trafo		8	adet	125.000	1.000.000
İndirici Merkez		1	adet	4.000.000	4.000.000
ENH		1	adet	1.570.000	1.570.000
Topraklama		40	MWh	20.000	800.000
Beton, delgi, çakma		40	MWh	5.000	200.000
Elektrik-Mekanik İşçilik		40	MWh	30.000	1.200.000
Nakliye, Vinç, Tesviye, İş Makinesi		40	MWh	20.000	800.000
Levhalar, Konnektör, Spiral Boru		40	MWh	5.000	200.000
Tel Çit, Güvenlik Kamerası, Bekçi Evi		40	MWh	5.000	200.000
Projelendirme, danışmanlık		40	MWh	5.000	200.000
Diğer		40	MWh	5.000	200.000
TOPLAM					35.232.000
Wp Başına Fiyat					0,587

3. SİMÜLASYON İLE MODELLEME

Simülasyon ile üretim tahminlemesi için modelleme yapılmıştır. Santral için belirlenen panel gücü, invertör güç değeri ve bu ekipmanlara ait teknik özellikler simülasyona girilmiştir. Lokasyon seçimi baz alınarak ilgili lokasyona ait iklim dataları temelinde simülasyon modellemesi yapılmıştır. Şekil 4, simülasyon ile modellenmiş aylık elektrik üretim değerlerini göstermekte olup, sonuçlara göre üretim değerleri kış aylarında (Aralık–Ocak) minimum seviyelerde gerçekleşirken, ilkbahar aylarından itibaren hızlı bir artış eğilimi göstermekte ve Temmuz ayında yaklaşık 16 milyon kWh ile maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Yaz aylarında (Haziran–Ağustos) artan güneşlenme süresi ve yüksek radyasyon değerleri nedeniyle üretim tepe noktalarına ulaşırken, sonbahar döneminde (Eylül–Kasım) kademeli bir azalış gözlemlenmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, sistemin en yüksek performansı yaz aylarında sergilediği ve yıllık üretimin önemli bir kısmının bu dönemde gerçekleştiği görülmektedir. Burada toplam yıllık üretim 120 milyon kWh olata tahminlenmiştir. Bu yaklaşık değer olup yıl içerisinde %5'e kadar iklimsel koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebilir.



Şekil 4. Aylık Elektrik Üretim Tahmini Dağılımı

4. GİDERLER

Kütahya ilinde kurulması planlanan YEKA Kütahya GES (40 MWe/60 MWp) güneş enerjisi santrali için 2 tane tekniker 1 adet mühendis ve 3 adet bekçi olmak üzere 6 adet personel çalışması öngörülmüştür. Buna göre giderler için öngörülen maliyet tablosu Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Giderler İçin Öngörülen Maliyet Tablosu

Ay	Personel Gideri (USD)	Sigorta Gideri (USD)	Bakım Gideri (USD)	Diğer Masraflar (USD)	Aylık Toplam (USD)
Ocak	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Şubat	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Mart	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Nisan	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Mayıs	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Haziran	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Temmuz	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Ağustos	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Eylül	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Ekim	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Kasım	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Aralık	7.000	6.000	10.000	5.000	28.000
Toplam	84.000	72.000	120.000	60.000	336.000

5. ÜRETİLEN ENERJİDEN ELDE EDİLEN GELİR VE AMORTİSMAN

Proje kapsamında lisans süresi 49 yıl olarak belirlenmiş olup, tesisin kurulum sürecinin yaklaşık 1,5 yıl içerisinde tamamlanması öngörülmektedir. İşletme aşamasında ise ilk etapta 3,5 yıl boyunca serbest piyasada elektrik satışı gerçekleştirilmesi planlanmakta, bu sürecin ardından 20 yıl boyunca YEKDEM kapsamında sabit fiyat mekanizmasından faydalanılması öngörülmektedir. Tablo 5'te elektrik satış senaryoları ve birim fiyat analizi sunulmuştur.

Tablo 5. Elektrik Satış Senaryoları ve Birim Fiyat Analizi

Satış Türü	Parametre	Birim Fiyat
Serbest Piyasa (3,5 yıl)	Son 1 yıl ortalama	6,814 ABD Doları-cent/kWh
Serbest Piyasa	2024 yılı ortalaması	6,81 ABD Doları-cent/kWh
Serbest Piyasa	Son 3 ay ortalaması	7,046 ABD Doları-cent/kWh
Serbest Piyasa	Son 1 ay ortalaması	7,174 ABD Doları-cent/kWh
Serbest Piyasa	Banka kabul ettiği satış fiyatı	6,7 ABD Doları-cent/kWh
Serbest Piyasa	Minimum satış fiyatı	4,95 ABD Doları-cent/kWh
Yarışma	MW başına katkı payı	40.000 USD
YEKDEM (20 yıl)	Taban fiyat	3,25 ABD Doları-cent/kWh
YEKDEM	Yerli invertör desteği	+0,3 ABD Doları-cent/kWh

Fizibilite çalışması kapsamında, santralin 1 Ocak 2027 tarihi itibarıyla kurulumunun tamamlanmış ve elektrik satışına başlamış olacağı varsayılmıştır. Bu doğrultuda proje takvimi; yaklaşık 6 aylık sözleşme ve izin süreçlerini takiben 18 aylık projelendirme, mühendislik, tedarik ve kurulum aşamalarını içerecek şekilde planlanmıştır. Belirlenen bu zaman çizelgesi, yatırımın öngörülen süre içerisinde devreye alınmasını ve gelir üretmeye başlamasını hedeflemektedir. Tablo 6’da, 10 yıllık elektrik üretimi ve gelir projeksiyonu (serbest piyasa ve yekdem senaryoları) sunulmuştur.

Tablo 6. 10 Yıllık Elektrik Üretimi ve Gelir Projeksiyonu (Serbest Piyasa ve YEKDEM Senaryoları)

Yıl	Ay	Ortalama Üretim Tahmini (kWh)	Satış	Birim Satış Fiyatı (ABD Doları- cent/kWh)	Güneş enerjisine dayalı üretim tesisi Geliri (USD)
1	Oca.2027	5.677.791	Serbest Piyasa	6,700	380.412
	Şub.2027	6.931.013	Serbest Piyasa	6,700	464.378
	Mar.2027	8.578.027	Serbest Piyasa	6,700	574.728
	Nis.2027	10.376.005	Serbest Piyasa	6,700	695.192
	May.2027	12.880.691	Serbest Piyasa	6,700	863.006
	Haz.2027	14.147.418	Serbest Piyasa	6,700	947.877
	Tem.2027	15.103.846	Serbest Piyasa	6,700	1.011.958
	Ağu.2027	13.767.376	Serbest Piyasa	6,700	922.414
	Eyl.2027	10.963.945	Serbest Piyasa	6,700	734.584
	Eki.2027	8.223.289	Serbest Piyasa	6,700	550.960
	Kas.2027	5.599.309	Serbest Piyasa	6,700	375.154
	Ara.2027	4.751.290	Serbest Piyasa	6,700	318.336
2	Oca.2028	5.677.791	Serbest Piyasa	6,700	380.412
	Şub.2028	6.931.013	Serbest Piyasa	6,700	464.378
	Mar.2028	8.578.027	Serbest Piyasa	6,700	574.728
	Nis.2028	10.376.005	Serbest Piyasa	6,700	695.192
	May.2028	12.880.691	Serbest Piyasa	6,700	863.006
	Haz.2028	14.147.418	Serbest Piyasa	6,700	947.877
	Tem.2028	15.103.846	Serbest Piyasa	6,700	1.011.958
	Ağu.2028	13.767.376	Serbest Piyasa	6,700	922.414
	Eyl.2028	10.963.945	Serbest Piyasa	6,700	734.584
	Eki.2028	8.223.289	Serbest Piyasa	6,700	550.960
	Kas.2028	5.599.309	Serbest Piyasa	6,700	375.154
	Ara.2028	4.751.290	Serbest Piyasa	6,700	318.336
3	Oca.2029	5.677.791	Serbest Piyasa	6,700	380.412
	Şub.2029	6.931.013	Serbest Piyasa	6,700	464.378
	Mar.2029	8.578.027	Serbest Piyasa	6,700	574.728

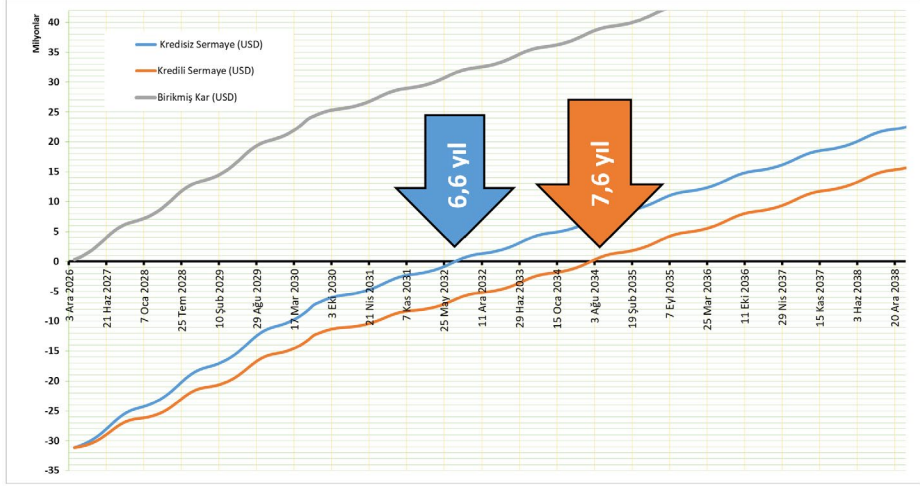
	Nis.2029	10.376.005	Serbest Piyasa	6,700	695.192
	May.2029	12.880.691	Serbest Piyasa	6,700	863.006
	Haz.2029	14.147.418	Serbest Piyasa	6,700	947.877
	Tem.2029	15.103.846	Serbest Piyasa	6,700	1.011.958
	Ağu.2029	13.767.376	Serbest Piyasa	6,700	922.414
	Eyl.2029	10.963.945	Serbest Piyasa	6,700	734.584
	Eki.2029	8.223.289	Serbest Piyasa	6,700	550.960
	Kas.2029	5.599.309	Serbest Piyasa	6,700	375.154
	Ara.2029	4.751.290	Serbest Piyasa	6,700	318.336
4	Oca.2030	5.677.791	Serbest Piyasa	6,700	380.412
	Şub.2030	6.931.013	Serbest Piyasa	6,700	464.378
	Mar.2030	8.578.027	Serbest Piyasa	6,700	574.728
	Nis.2030	10.376.005	Serbest Piyasa	6,700	695.192
	May.2030	12.880.691	Serbest Piyasa	6,700	863.006
	Haz.2030	14.147.418	Serbest Piyasa	6,700	947.877
	Tem.2030	15.103.846	YEKDEM	3,250	490.875
	Ağu.2030	13.767.376	YEKDEM	3,250	447.440
	Eyl.2030	10.963.945	YEKDEM	3,250	356.328
	Eki.2030	8.223.289	YEKDEM	3,250	267.257
	Kas.2030	5.599.309	YEKDEM	3,250	181.978
	Ara.2030	4.751.290	YEKDEM	3,250	154.417
5	Oca.2031	5.677.791	YEKDEM	3,250	184.528
	Şub.2031	6.931.013	YEKDEM	3,250	225.258
	Mar.2031	8.578.027	YEKDEM	3,250	278.786
	Nis.2031	10.376.005	YEKDEM	3,250	337.220
	May.2031	12.880.691	YEKDEM	3,250	418.622
	Haz.2031	14.147.418	YEKDEM	3,250	459.791
	Tem.2031	15.103.846	YEKDEM	3,250	490.875
	Ağu.2031	13.767.376	YEKDEM	3,250	447.440
	Eyl.2031	10.963.945	YEKDEM	3,250	356.328
	Eki.2031	8.223.289	YEKDEM	3,250	267.257
	Kas.2031	5.599.309	YEKDEM	3,250	181.978
	Ara.2031	4.751.290	YEKDEM	3,250	154.417
6	Oca.2032	5.677.791	YEKDEM	3,250	184.528
	Şub.2032	6.931.013	YEKDEM	3,250	225.258

	Mar.2032	8.578.027	YEKDEM	3,250	278.786
	Nis.2032	10.376.005	YEKDEM	3,250	337.220
	May.2032	12.880.691	YEKDEM	3,250	418.622
	Haz.2032	14.147.418	YEKDEM	3,250	459.791
	Tem.2032	15.103.846	YEKDEM	3,250	490.875
	Ağu.2032	13.767.376	YEKDEM	3,250	447.440
	Eyl.2032	10.963.945	YEKDEM	3,250	356.328
	Eki.2032	8.223.289	YEKDEM	3,250	267.257
	Kas.2032	5.599.309	YEKDEM	3,250	181.978
	Ara.2032	4.751.290	YEKDEM	3,250	154.417
	Oca.2033	5.677.791	YEKDEM	3,250	184.528
7	Şub.2033	6.931.013	YEKDEM	3,250	225.258
	Mar.2033	8.578.027	YEKDEM	3,250	278.786
	Nis.2033	10.376.005	YEKDEM	3,250	337.220
	May.2033	12.880.691	YEKDEM	3,250	418.622
	Haz.2033	14.147.418	YEKDEM	3,250	459.791
	Tem.2033	15.103.846	YEKDEM	3,250	490.875
	Ağu.2033	13.767.376	YEKDEM	3,250	447.440
	Eyl.2033	10.963.945	YEKDEM	3,250	356.328
	Eki.2033	8.223.289	YEKDEM	3,250	267.257
	Kas.2033	5.599.309	YEKDEM	3,250	181.978
	Ara.2033	4.751.290	YEKDEM	3,250	154.417
8	Oca.2034	5.677.791	YEKDEM	3,250	184.528
	Şub.2034	6.931.013	YEKDEM	3,250	225.258
	Mar.2034	8.578.027	YEKDEM	3,250	278.786
	Nis.2034	10.376.005	YEKDEM	3,250	337.220
	May.2034	12.880.691	YEKDEM	3,250	418.622
	Haz.2034	14.147.418	YEKDEM	3,250	459.791
	Tem.2034	15.103.846	YEKDEM	3,250	490.875
	Ağu.2034	13.767.376	YEKDEM	3,250	447.440
	Eyl.2034	10.963.945	YEKDEM	3,250	356.328
	Eki.2034	8.223.289	YEKDEM	3,250	267.257
	Kas.2034	5.599.309	YEKDEM	3,250	181.978
9	Ara.2034	4.751.290	YEKDEM	3,250	154.417
	Oca.2035	5.677.791	YEKDEM	3,250	184.528

10	Şub.2035	6.931.013	YEKDEM	3,250	225.258
	Mar.2035	8.578.027	YEKDEM	3,250	278.786
	Nis.2035	10.376.005	YEKDEM	3,250	337.220
	May.2035	12.880.691	YEKDEM	3,250	418.622
	Haz.2035	14.147.418	YEKDEM	3,250	459.791
	Tem.2035	15.103.846	YEKDEM	3,250	490.875
	Ağu.2035	13.767.376	YEKDEM	3,250	447.440
	Eyl.2035	10.963.945	YEKDEM	3,250	356.328
	Eki.2035	8.223.289	YEKDEM	3,250	267.257
	Kas.2035	5.599.309	YEKDEM	3,250	181.978
	Ara.2035	4.751.290	YEKDEM	3,250	154.417
	Oca.2036	5.677.791	YEKDEM	3,250	184.528
	Şub.2036	6.931.013	YEKDEM	3,250	225.258
	Mar.2036	8.578.027	YEKDEM	3,250	278.786
	Nis.2036	10.376.005	YEKDEM	3,250	337.220
	May.2036	12.880.691	YEKDEM	3,250	418.622
	Haz.2036	14.147.418	YEKDEM	3,250	459.791
	Tem.2036	15.103.846	YEKDEM	3,250	490.875
	Ağu.2036	13.767.376	YEKDEM	3,250	447.440
	Eyl.2036	10.963.945	YEKDEM	3,250	356.328
	Eki.2036	8.223.289	YEKDEM	3,250	267.257
	Kas.2036	5.599.309	YEKDEM	3,250	181.978
	Ara.2036	4.751.290	YEKDEM	3,250	154.417

6. SONUÇ

Kütahya’da kurulması planlanan YEKA Kütahya GES (40 MWe/60 MWp) güneş enerjisi santrali için 10 yıllık maliyet analizi yapılmıştır. Maliyet analizinin 42 ayı serbest piyasa değerinden satışı diğer kısmı ise YEKDEM değerinden satışı öngörmektedir. Aylık personel ve işletme gideri olarak 28.000 USD ayrılmıştır. Kredisiz sermaye kullanılması durumunda 80 ayda (6,66 yıl) amorti etmektedir. %6,5 kredili sermaye kullanılması durumunda 92 ayda (7,66 yıl) amorti etmektedir. Kredi kullanılması durumunda 92 ay (7,66 yıl) sonunda 6.803.367 USD faiz ödenecektir. Şekil 5’te kredili ve kredisiz senaryolar için kümülatif nakit akışı ve geri ödeme süresi analizi sunulmuştur. Projenin geri dönüş noktası kabul edilebilir sınırlar içerisinde.



Şekil 5. Kredili ve Kredisiz Senaryolar İçin Kümülatif Nakit Akışı ve Geri Ödeme Süresi Analizi

AÇIKLAMA

STB Proje Kodu: 118095, PV Santraller İçin Standartlaştırılmış Risk Değerlendirme ve Sigorta Uyumlu Kalite Kontrol Yönteminin Geliştirilmesi adlı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1]. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığından, Güneş Enerjisine Dayalı Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları Ve Bağlantı Kapasitelerinin Tahsisine İlişkin Yarışma İlanı
(Yeka Ges-2024 Yarışma İlanı),
<https://www.resmigazete.gov.tr/ilanlar/eskiilanlar/2024/11/20241104-4-0.pdf>,
- [2]. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yeka Ges-2024 Yarışmalarına İlişkin Duyuru, <https://enerji.gov.tr/duyuru-detay?id=30486>
- [3]. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, YEKA GES-2024 Şartname, https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/BHIM/tr/Duyurular//YEKA_GES-2024_%C5%9Eartname_202411041002.pdf,
- [4]. Google Earth, <https://earth.google.com/>
- [5]. Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, <https://gepa.enerji.gov.tr/pages/43.aspx>

BÖLÜM 2

FOTOVOLTAİK SİSTEMLERDE İNVERTÖR KONFIGÜRASYONU VE PERFORMANS ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Doç. Dr. Furkan DİNÇER ¹

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.21207043>

¹ Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Kahramanmaraş Sutcu Imam University, 0000-0001-6787-0850
furkandincer@ksu.edu.tr

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, çatı tipi bir fotovoltaik güç santralinin teknik, yapısal ve işletme performansı invertörler açısından değerlendirilmiştir. İnceleme kapsamında santral bileşenlerinden panellerde üretilen elektrik enerjisinin şebeke senkronizasyonunu sağlayan ve doğru akımı elektrik akıma çeviren invertörlerin performans durumu analiz edilmiştir. Her invertör ayrı ayrı analiz edilmiş ve denetlenmiştir. Değerlendirme sürecinde saha gözlemleri, termal ölçümler ve sistem verileri esas alınarak, mevcut kurulumun performansına etki eden parametreler belirlenmiştir. Bu doğrultuda, santral için invertörlerin mevcut durumları detaylı olarak analiz edilmiştir.

Denetimi yapılan fotovoltaik santral, toplam 49.866,73 m² parsel alanı içerisinde yer almakta olup yaklaşık 4.500 m² çatı alanının 3.100 m²'lik kısmı aktif olarak kullanılmaktadır. Tesis, 2500 kVA trafo gücüne ve 1500 kW sözleşme gücüne sahip sanayi abone grubunda işletilmekte olup, toplam 440 kWe AC kurulu güce karşılık 592,35 kWp DC kurulu güce sahiptir. Sistem, her biri 550 W gücünde toplam 1077 adet fotovoltaik panel bulunmaktadır. DC/AC oranı 1,346 seviyesindedir. Her biri 50 kWe gücünde olan toplam 9 adet inverter kullanılmıştır. Tesise ait çatı alanı Şekil 1'de gösterilmektedir. Toplam mevcut çatı alanı yaklaşık 4.500 m² olarak tespit edilmiştir.



Şekil 1. Mevcut Çatı Alanı

2. SANTRALİN GENEL GÖRÜNÜMÜ

Santralde toplamda 1077 adet 550 Wp gücünde güneş paneli bulunmaktadır. Şekil 2’de santrale ait genel görünüm sunulmuştur. Tesis kurulu ve çalışır durumdadır.



Şekil 2. Santrale Ait Genel Görünüm

Santralde toplamda 9 adet 50 kWe gücünde invertör bulunmaktadır. Şekil 3’te invertörlerin ve panonun bulunduğu yere ait fotoğraf sunulmuştur.



Şekil 3. İnvörtör ve Pano Odası

Tablo 1’de, incelenen fotovoltaik santrale ait temel teknik parametreler, kurulu güç değerleri ve elektriksel bileşen özellikleri özetlenmiştir. 9 adet invertör ile santralin üretim kapasitesi 450 kWe olup, izin alınan bağlantı sözleşme gücü 440 kWe olduğu için santral gücü 440 kWe olarak sınırlandırılmıştır.

Tablo 1. Santrale Ait Özet Bilgiler ve Elektriksel Özellikler

<i>Toplam Parsel Alanı</i>	49.866,73 m²
<i>Mevcut Yaklaşık Çatı Alanı</i>	4.500 m ²
<i>Kullanılan Yaklaşık Çatı Alanı</i>	3.100 m ²
<i>Trafo Gücü</i>	2500 kVA
<i>Sözleşme Gücü</i>	1500 kW
<i>Abone Türü</i>	Sanayi Tek Terimli OG
<i>Santral Gücü (kWe)</i>	440 kWe
<i>PV Gücü (kWp)</i>	592,35 kWp
<i>Panel (DC) Yüklenme Değeri</i>	1,346
<i>Bir Panel Gücü (W)</i>	550 W
<i>Panel Sayısı</i>	1077 adet
<i>Bir İnvertör Gücü (kWe)</i>	50 kWe
<i>İnvertör Sayısı</i>	9 adet

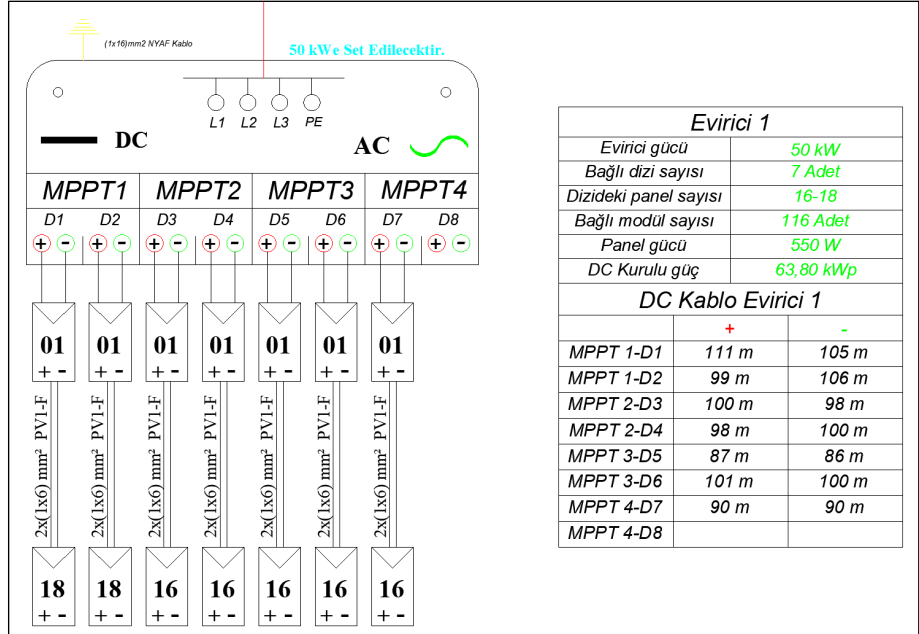
3. İNVERTÖRLER

Sahada toplamda 9 adet 50 kWe invertör bulunmaktadır. Her invertör için seri numaraları aşağıda belirtilmiştir. 9 adet invertörden 6 adedi çalışır olarak gözlemlenmiştir. Diğer 3 tanesi operasyonel nedenlerden ötürü devreye henüz alınmamıştır. Diziler arasındaki veriler sınırlı zamanda üretim değerleri ile değerlendirilmiştir. Bundan ötürü 17 Haziran 2025 tarihi öğle vakti 12:40 saatinde çalışır durumda olan invertörlerin dizi akımları karşılaştırılmıştır. INV-1 incelendiğinde 8 numaralı diziye bağlantı yapılmadığı, 7 adet dizi için invertörün kullanıldığı gözlemlenmiştir. Özellikle 7 numaralı dizi ile diğer diziler arasında önemli akım farklılığı bulunmaktadır. Kontrol edilmelidir. Diğer diziler ile olan lokasyonuna da bakılabilir.

Şekil 4’te, İnvertör 1 için mevcut elektriksel durum verilmiştir. 1-2 numaralı dizilerde diğer dizilere göre daha yüksek gerilim olmasının nedeni bu iki diziye 18’li seri panel, diğerlerine 16’lı seri panel bağlanmış olmasıdır.



String	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	PV6	PV7	PV8
Input Voltage (V)	816	816	734	734	734.5	734.5	728.2	728.2
Input Current (A)	-0.31	0	0	0	0	0	0	0

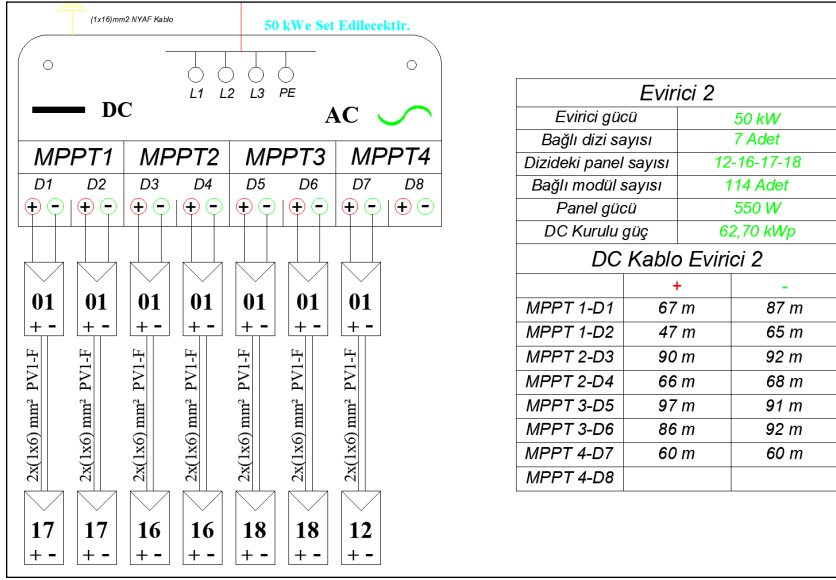


Şekil 4. İnvertör 1 için Mevcut Elektriksel Durum

Şekil 5'te, İnvörtör 2 için mevcut elektriksel durum verilmiştir. INV-2 incelendiğinde 8 numaralı diziye bağlantı yapılmadığı, 7 adet dizi için invertörün kullanıldığı gözlemlenmiştir. Diğer dizi akımları birbirine yakın konumdadır. Uygun olarak gözlemlenmiştir. Ancak, dizi dağılımları dengesiz oluşturulmuştur. 7 numaralı diziye 12'li seri panel bağlanırken, 2 dizi 18'li seri, 2 dizi 17'li seri, diğer 2 dizi için de 16'lı seri oluşturulmuştur. Panel-Evirici Uygunluk hesaplarına göre enerji üretiminde invertörün daha düşük verimde çalışmasına neden olmaktadır. Panel-Evirici uygunluk hesaplarda panelin maksimum güç noktasındaki gerilim değeri, akım değeri vb. elektriksel özellikler baz alınarak eviricinin elektriksel özelliklerine göre seri-paralel dizi grupları oluşturulur. Bu hesaplamalarda eviricinin maksimum güç noktasında maksimum performans ile çalışabilmesi için buna göre seri-paralel olmak üzere panel gruplamaları oluşturulur.

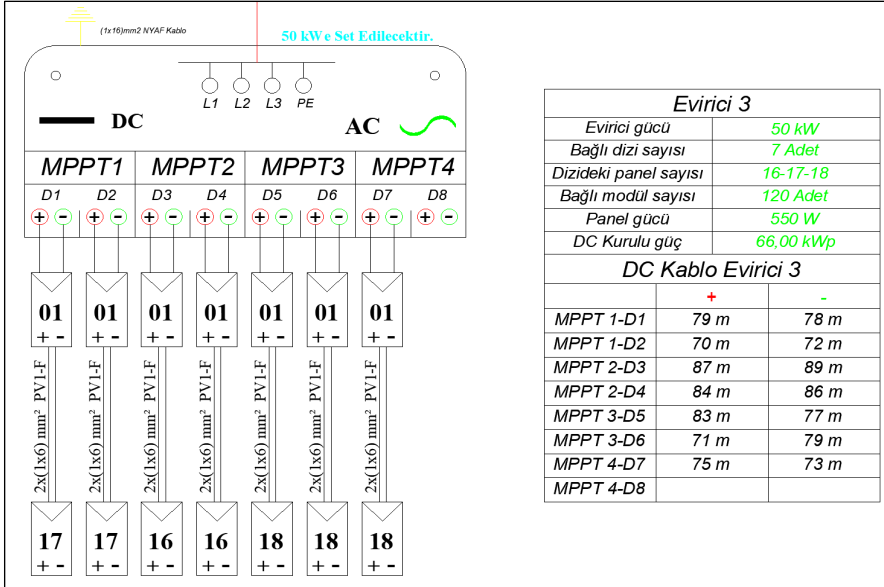
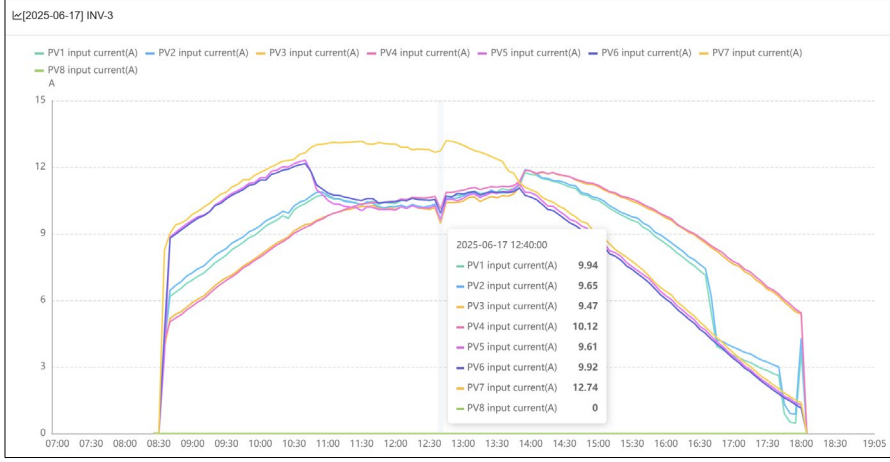


String	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	PV6	PV7	PV8
Input Voltage (V)	658.2	658.2	631.9	631.9	697.5	697.5	462	462
Input Current (A)	7.12	7.04	4.63	5.63	2.81	5.29	8.25	0



Şekil 5. İnvörtör 2 için Mevcut Elektriksel Durum

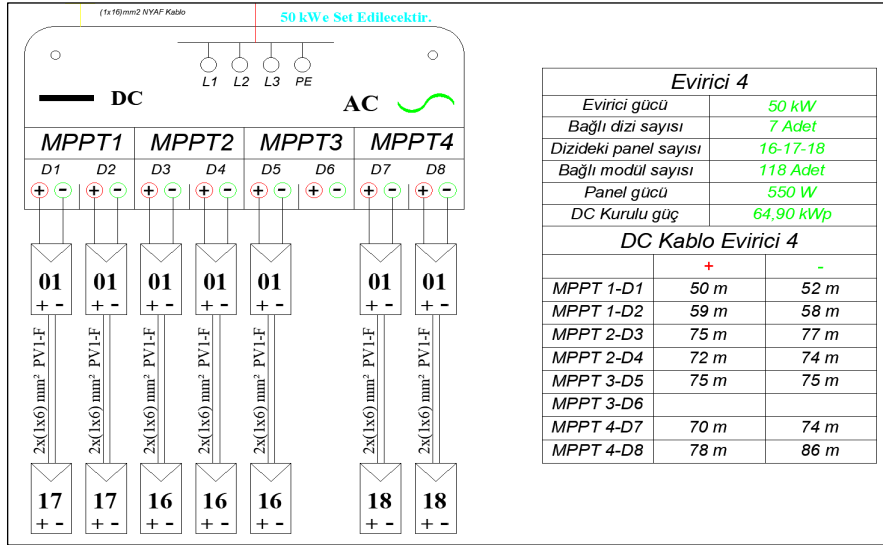
Şekil 6'da İnvörtör 3 için mevcut elektriksel durum verilmiştir. INV-3 incelendiğinde 8 numaralı diziye bağlantı yapılmadığı, 7 adet dizi için invertörün kullanıldığı gözlemlenmiştir. Özellikle 7 numaralı dizi ile diğer diziler arasında önemli akım farklılığı bulunmaktadır. Kontrol edilmelidir. Diğer diziler ile olan lokasyonuna da bakılabilir. Ancak, dizi dağılımları dengesiz oluşturulmuştur. 3 dizi 18'li seri, 2 dizi 17'li seri, diğer 2 dizi için de 16'lı seri oluşturulmuştur. Panel-Evirici Uygunluk hesaplarına göre enerji üretiminde invertörün daha düşük verimde çalışmasına neden olmaktadır.



Şekil 6. İnvörtör 3 için Mevcut Elektriksel Durum

Şekil 7’de İnvörtör 4 için mevcut elektriksel durum verilmiştir. INV-4 incelendiğinde 6 numaralı diziye bağlantı yapılmadığı, 7 adet dizi için invertörün kullanıldığı gözlemlenmiştir. Özellikle 4 numaralı dizi ile diğer diziler arasında önemli akım farklılığı bulunmaktadır. Kontrol edilmelidir. Diğer diziler ile olan lokasyonuna da bakılabilir. Ancak, dizi dağılımları dengesiz oluşturulmuştur. 3 dizi 16’lı seri, 2 dizi 17’li seri, diğer 2 dizi için de

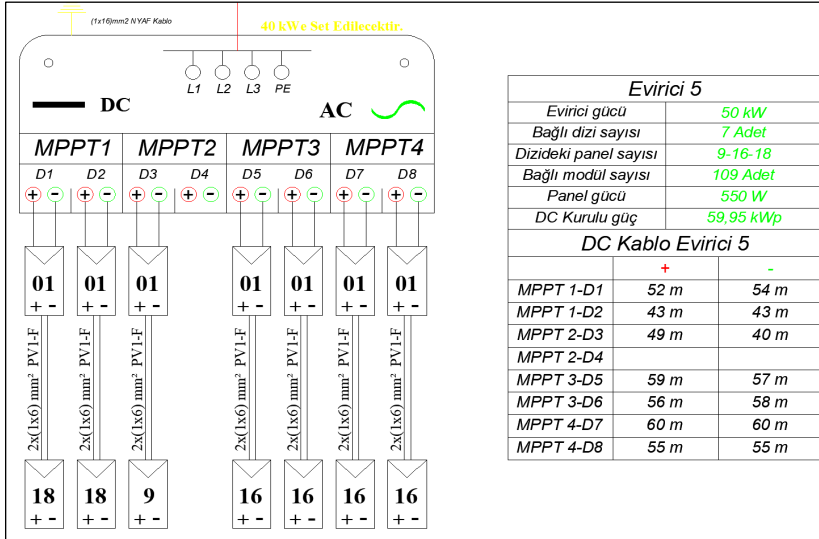
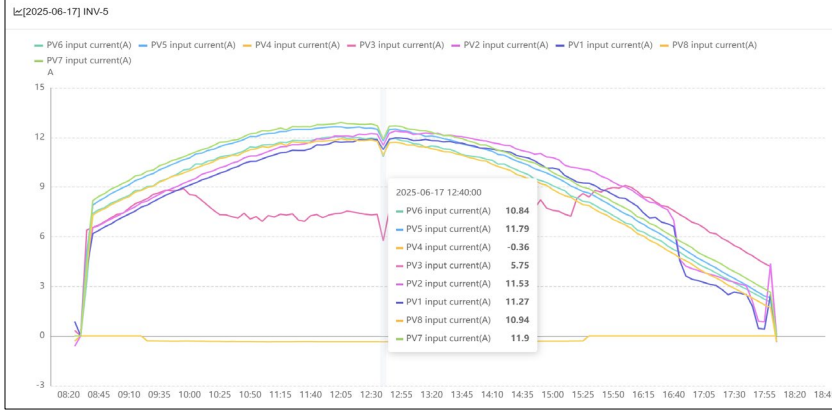
18’li seri oluşturulmuştur. Panel-Evirici Uygunluk hesaplarına göre enerji üretiminde invertörün daha düşük verimde çalışmasına neden olmaktadır.



Şekil 7. İnvörtör 4 için Mevcut Elektriksel Durum

Şekil 8’de İnvörtör 5 için mevcut elektriksel durum verilmiştir. INV-5 incelendiğinde 4 numaralı diziye bağlantı yapılmadığı, 7 adet dizi için invertörün kullanıldığı gözlemlenmiştir. Özellikle 3 numaralı dizi ile diğer diziler arasında önemli akım farklılığı bulunmaktadır. Kontrol edilmelidir. Diğer diziler ile olan lokasyonuna da bakılabilir. Ancak, dizi dağılımları

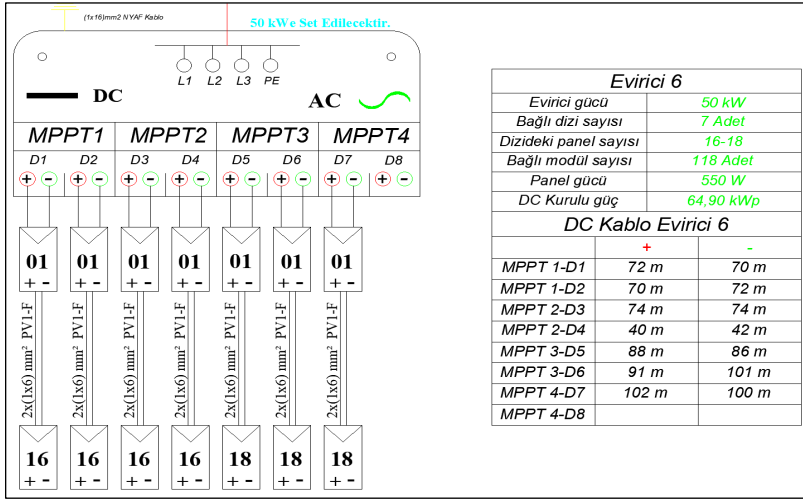
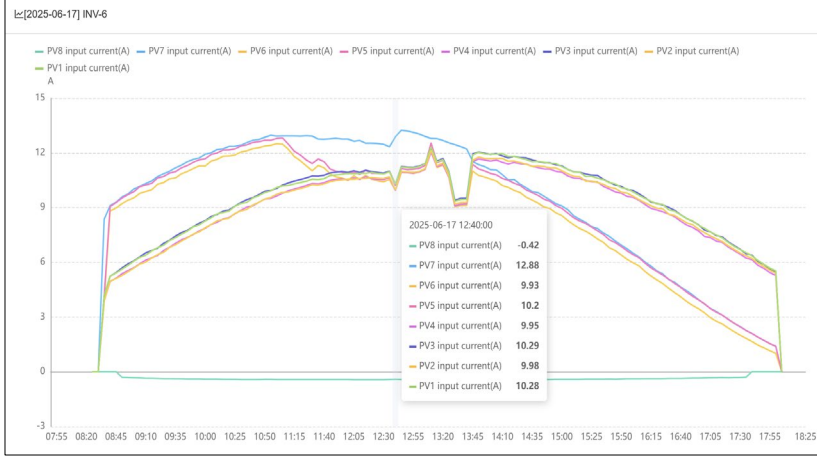
dengelessiz oluşturulmuştur. 4 dizi 16'lı seri, 2 dizi 18'li seri, diğer 1 dizi için de 9'lu seri oluşturulmuştur. Panel-Evirici Uygunluk hesaplarına göre enerji üretiminde invertörün daha düşük verimde çalışmasına neden olmaktadır.



şekil 8. İnvirtr 5 için Mevcut Elektriksel Durum

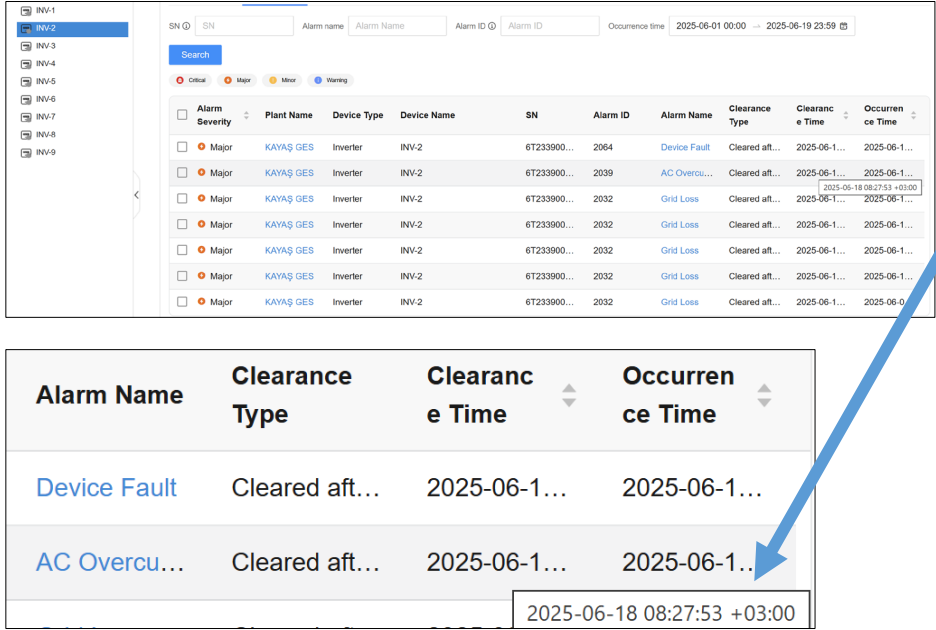
şekil 9'da İnvirtr 6 için mevcut elektriksel durum verilmiştir. INV-6 incelendiğinde 8 numaralı diziye bağlantı yapılmadığı, 7 adet dizi için invertörün kullanıldığı gözlemlenmiştir. Özellikle 7 numaralı dizi ile diğer diziler arasında önemli akım farklılığı bulunmaktadır. Kontrol edilmelidir. Diğer diziler ile olan lokasyonuna da bakılabilir. Ancak, dizi dağılımları dengelessiz oluşturulmuştur. 4 dizi 16'lı seri, 3 dizi 18'li seri oluşturulmuştur.

Panel-Evirici Uygunluk hesaplarına göre enerji üretiminde invertörün daha düşük verimde çalışmasına neden olmaktadır.



Şekil 9. İnvörtör 6 için Mevcut Elektriksel Durum

Ek olarak; INV-2’de aşırı akım arızası meydana gelmiş olarak görünüyor. Şekil 10’da sisteme ait ekran görüntüsü paylaşılmıştır. Sonradan bu arıza tekrar log oluşturmamış. İlerleyen zamanlarda sorun yaşanmaması adına takip altında tutulmalıdır.



Alarm Severity	Plant Name	Device Type	Device Name	SN	Alarm ID	Alarm Name	Clearance Type	Clearance Time	Occurrence Time
Major	KAYAŞ GES	Inverter	INV-2	6T233900...	2064	Device Fault	Cleared aft...	2025-06-1...	2025-06-1...
Major	KAYAŞ GES	Inverter	INV-2	6T233900...	2039	AC Overcu...	Cleared aft...	2025-06-1...	2025-06-1...
Major	KAYAŞ GES	Inverter	INV-2	6T233900...	2032	Grid Loss	Cleared aft...	2025-06-1...	2025-06-1...
Major	KAYAŞ GES	Inverter	INV-2	6T233900...	2032	Grid Loss	Cleared aft...	2025-06-1...	2025-06-1...
Major	KAYAŞ GES	Inverter	INV-2	6T233900...	2032	Grid Loss	Cleared aft...	2025-06-1...	2025-06-1...
Major	KAYAŞ GES	Inverter	INV-2	6T233900...	2032	Grid Loss	Cleared aft...	2025-06-1...	2025-06-1...
Major	KAYAŞ GES	Inverter	INV-2	6T233900...	2032	Grid Loss	Cleared aft...	2025-06-1...	2025-06-1...

Alarm Name	Clearance Type	Clearance Time	Occurrence Time
Device Fault	Cleared aft...	2025-06-1...	2025-06-1...
AC Overcu...	Cleared aft...	2025-06-1...	2025-06-1...

2025-06-18 08:27:53 +03:00

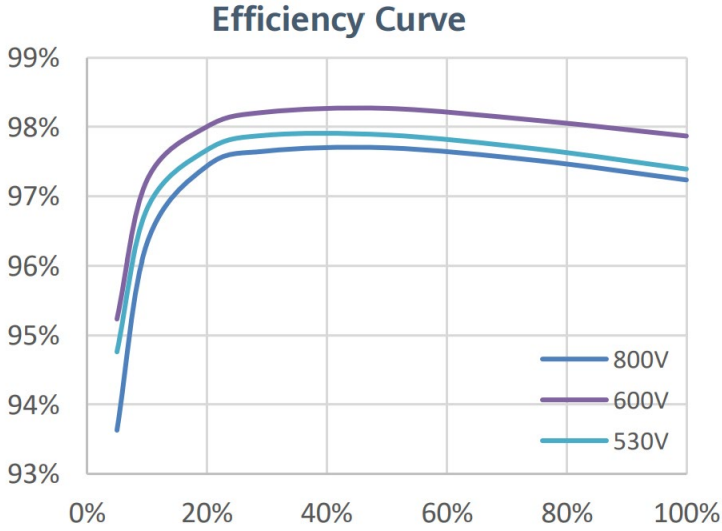
Şekil 10. İnvörtör 2 için Arıza Log Kaydı

Arızaya ait neden olarak [1], şebekede ani bir gerilim düşüşünün oluşmasından kaynaklı olabilir veya kısa devrenin meydana gelmesi şeklinde belirtilmektedir. Çözüm önerisi olarak [1]; sistem, çevresel ve şebeke koşullarını anlık olarak izlemekte olup, arızaya neden olan durum ortadan kalktığında cihaz otomatik olarak normal çalışma moduna geri dönmektedir, alarm durumunun sık tekrar etmesi ve santral işletimini olumsuz etkilemesi halinde, AC tarafında olası bir kısa devre durumu kontrol edilmelidir. Sorunun devam etmesi durumunda yetkili servis veya teknik destek birimi ile iletişime geçilmesi önerilmektedir, şeklinde belirtilmektedir.

Panel-İnvörtör için uygunluk hesabı yapılmıştır. İnvörtörün ortalama 25 °C sıcaklıkta 18'li seri ile yaklaşık 755 Volt değerinde çalışması ile 9'lu seri ile 377 Volt değerinde çalışması yaklaşık %3 verim kaybına yol açmaktadır. Şekil 11, inverter veriminin yük oranına (% yük) ve DC giriş gerilimine (530 V, 600 V, 800 V) bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. Grafığe göre, tüm gerilim seviyelerinde düşük yük oranlarında verimin belirgin şekilde düşük olduğu, ancak yük arttıkça verimin hızlı bir şekilde yükseldiği görülmektedir. Yaklaşık %20–40 yük aralığında inverterlerin maksimum verim bölgesine

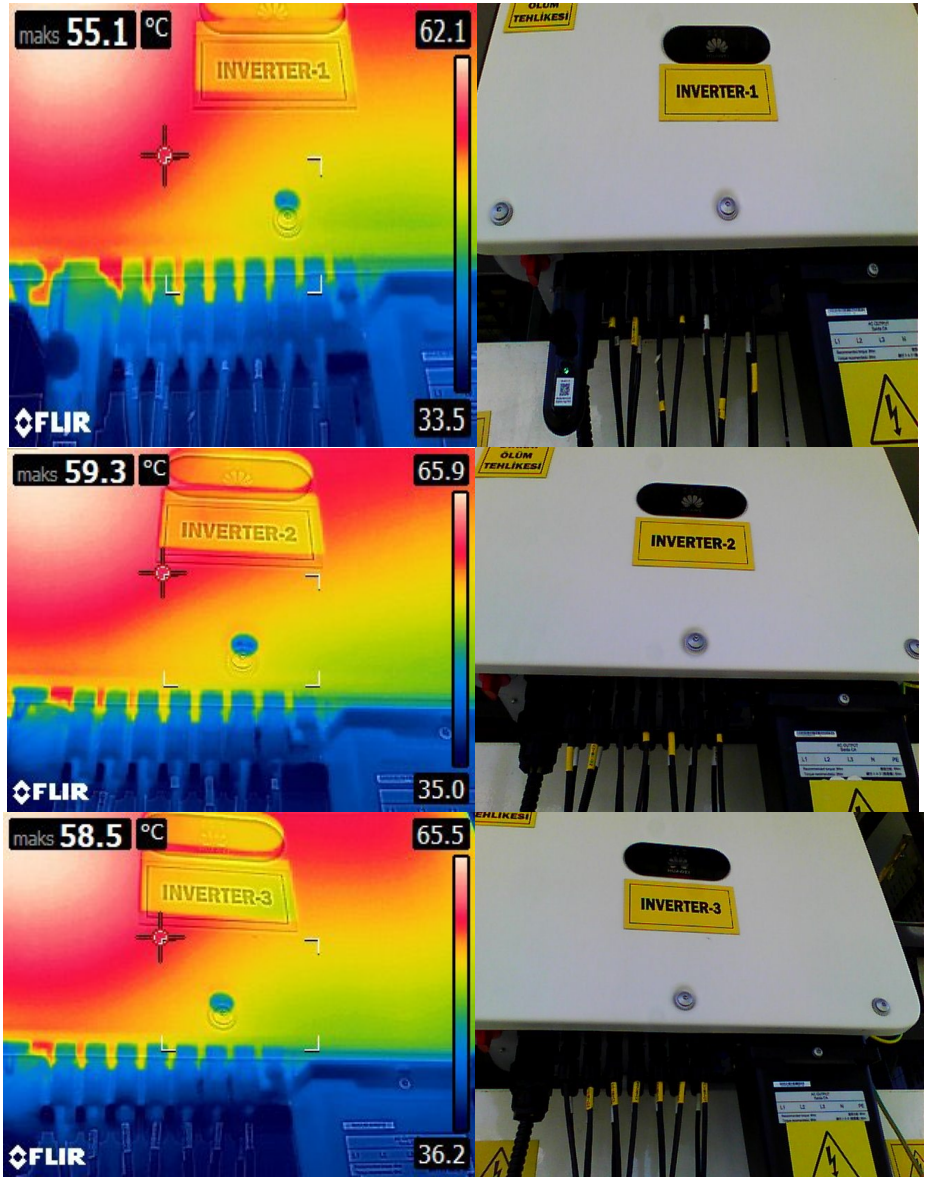
ulaştığı ve bu noktadan sonra verimde sınırlı bir artış ya da hafif bir düşüş eğilimi olduğu gözlemlenmektedir.

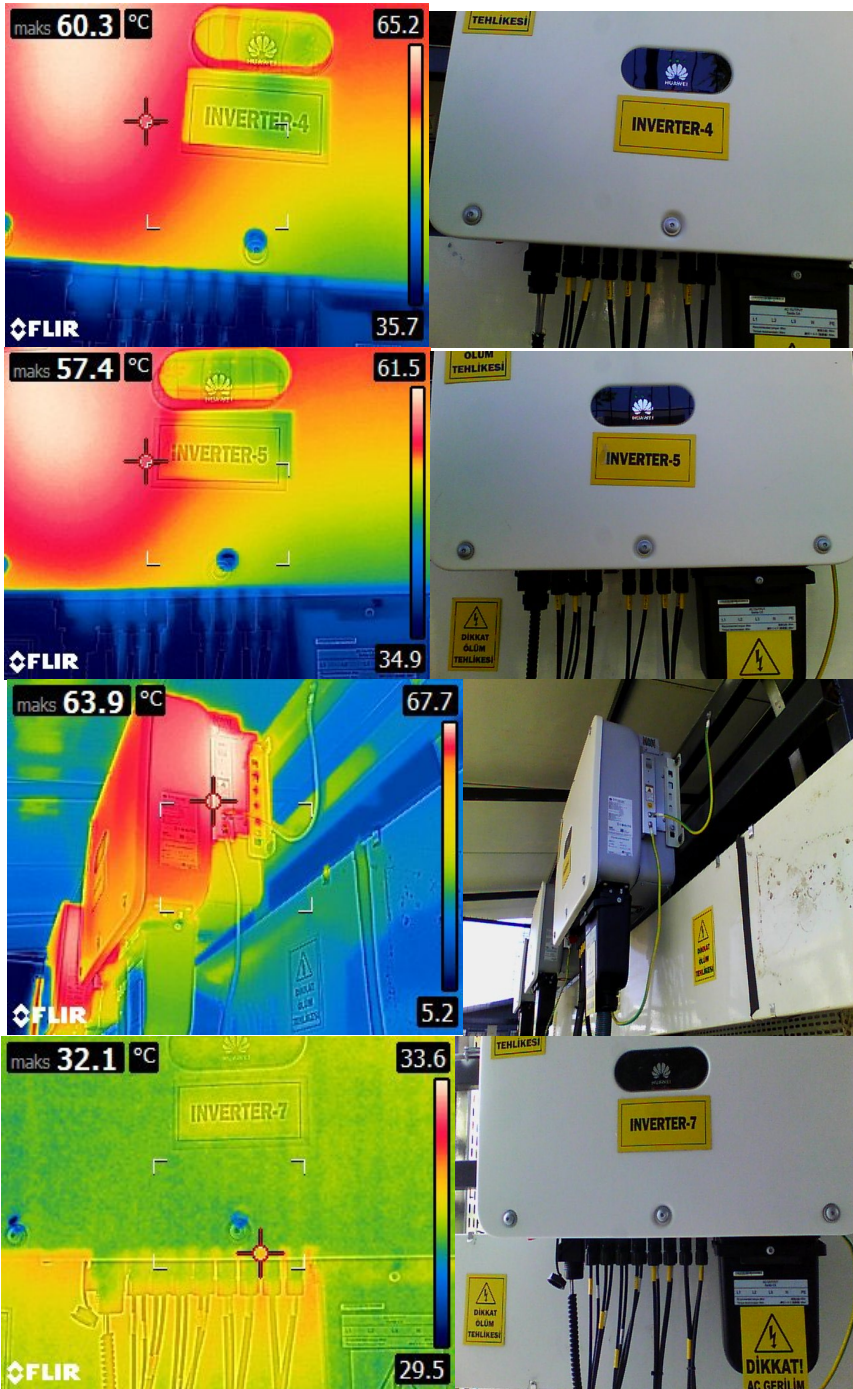
Şekil 11’de invertör yüklenme durumuna göre 530 V, 600 V ve 800 V DC giriş gerilimlerine göre çalışma verim grafiği sunulmuştur. Gerilim seviyeleri karşılaştırıldığında, 600 V seviyesinde inverterin en yüksek verim değerlerine ulaştığı (yaklaşık %98,2–98,3) görülmektedir. 530 V seviyesi bu değerin biraz altında kalırken, 800 V seviyesinde verim değerlerinin diğerlerine göre daha düşük olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, inverterin optimum çalışma geriliminin yaklaşık 600 V civarında olduğunu ve bu gerilim seviyesinde maksimum performans sergilediğini göstermektedir [2].

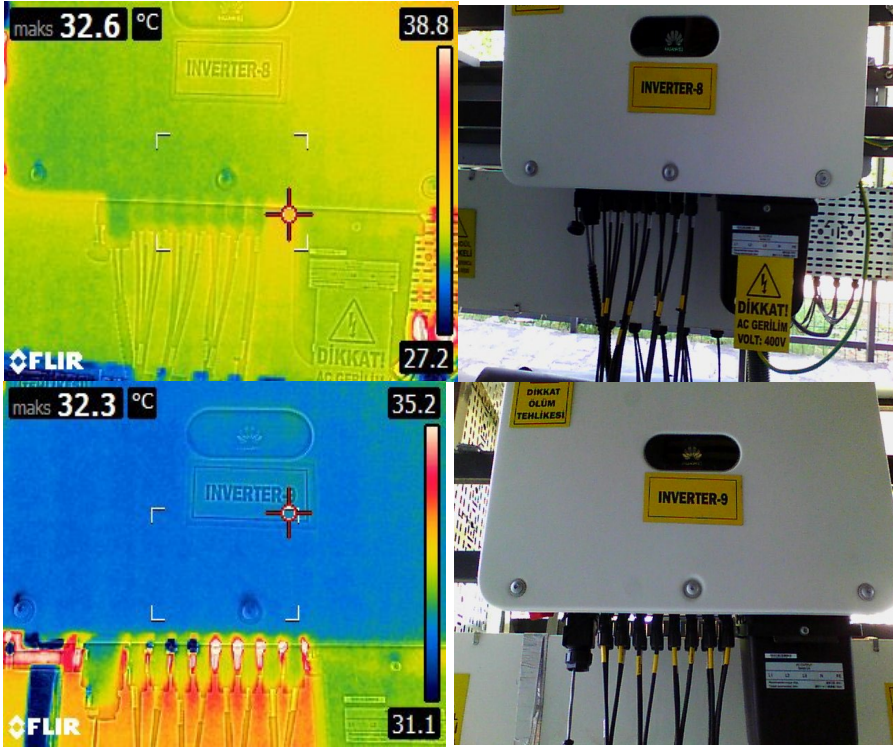


Şekil 11. İnvörtör Yükleme Durumuna Göre 530 V, 600 V ve 800 V DC Giriş Gerilimlerine Göre Çalışma Verim Grafiği [2]

İnvörtörler için termal kamera denetimi gerçekleştirilmiştir. Çalışan 1-6 numaralı invörtörlerde ortalama çalışma sırasında 60 °C civarında sıcaklık tespit edilmiştir. Normal olarak görülmüştür. Diğer çalışmada olmayan 7-9 numaralı invörtörlerde ortam sıcaklığından ötürü 30 °C civarında sıcaklık tespit edilmiştir. Şekil 12’de invörtörlere ait mevcut görüntü ve termal görüntüleri sunulmuştur.







Şekil 12. İnvertörlere ait Mevcut Görüntü ve Termal Görüntüler

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

İnvertörlere ilişkin incelemelerde, sistemin tasarım ve işletme performansı açısından dikkat çekici bulgular elde edilmiştir. Sahada toplam 9 adet 50 kWe gücünde invertör bulunduğu, ancak inceleme anında bunların yalnızca 6 adedinin çalışır durumda olduğu belirlenmiştir

Dizi bazlı değerlendirmelerde, birçok invertörde farklı sayılarda seri bağlı panel gruplarının aynı cihaz üzerinde birlikte kullanıldığı görülmüştür. Özellikle 16'lı, 17'li, 18'li ve bazı durumlarda 9'lu ya da 12'li stringlerin aynı invertörde yer alması, maksimum güç noktası takibi (MPPT) performansını olumsuz etkilemektedir. Bu durumun, invertörün optimum çalışma gerilim aralığından uzaklaşmasına neden olduğu ve enerji dönüşüm veriminde düşüş oluşturduğu değerlendirilmiştir. Nitekim yapılan uygunluk analizinde, yaklaşık 755 V seviyesinde çalışan bir string yapısı ile 377 V seviyesinde çalışan bir string yapısı arasında yaklaşık %3 düzeyinde verim kaybı oluşabileceği ifade edilmiştir. Bu nedenle, invertör bazında daha homojen string dağılımı

sağlanmasının sistem performansı açısından gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bunun yanında, bazı invertörlerde belirli dizilerde diğerlerine kıyasla belirgin akım farklılıkları gözlemlenmiştir. Özellikle bazı stringlerde düşük akım değerlerinin tespit edilmesi, dizi bazında bağlantı hatası, panel farklılığı, gölgelenme etkisi veya saha yerleşiminden kaynaklanan performans problemlerine işaret etmektedir. Bu tür farklılıkların yalnızca ilgili diziye değil, invertörün genel çalışma kararlılığına da olumsuz etki edebileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca invertörlerden birinde aşırı akım arızası kaydı bulunduğu, her ne kadar bu arıza sonradan tekrar etmemiş olsa da, ilerleyen süreçte sistem güvenilirliği açısından izleme altında tutulmasının gerekli olduğu anlaşılmaktadır.

Termal incelemeler sonucunda, çalışır durumda olan invertörlerde yaklaşık 60 °C seviyesinde sıcaklıklar ölçülmüş ve bu değerler normal çalışma koşulları içerisinde değerlendirilmiştir. Çalışmayan invertörlerde ise ortam etkisine bağlı olarak yaklaşık 30 °C seviyesinde sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Bu bulgu, aktif cihazlarda anormal bir termal yük oluşmadığını göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, invertörlerin marka ve güç kapasitesi bakımından sistem için uygun seçildiği, ancak bağlantı düzeni, string homojenliği, kısmi devreye alma durumu ve bazı arıza kayıtları nedeniyle mevcut performansın teorik potansiyelin altında kaldığı sonucuna varılmıştır.

Tesise ait tüketim değerleri de alınmıştır. Böylece üretim-tüketim dengesi de değerlendirilmiştir. Aylık tüketim ve üretim verileri birlikte değerlendirildiğinde, fotovoltaik sistemin yıl boyunca tüketimi karşılama oranının mevsimsel değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Kış aylarında (Aralık-Şubat döneminde) üretim değerlerinin düşük seviyelerde kaldığı ve tüketimi karşılama oranının %16-20 aralığında gerçekleştiği görülmektedir. İlkbahar aylarıyla birlikte güneşlenme süresinin artmasına bağlı olarak üretimde belirgin bir yükseliş gözlemlenmiş ve özellikle Mayıs ayında %58,14 seviyesine ulaşılmıştır. En yüksek karşılama oranı ise %63,75 ile Haziran ayında gerçekleşmiş olup, bu durum yaz aylarında sistem performansının en üst seviyeye çıktığını göstermektedir.

Yaz sonrası dönemde (Temmuz-Eylül) üretim yüksek seviyelerde kalmasına rağmen tüketimdeki artış nedeniyle karşılama oranında nispi bir düşüş gözlemlenmiştir. Sonbahar aylarında ise güneşlenme süresinin

azalmasıyla birlikte üretim tekrar düşüş eğilimine girmiş ve oranlar %25 seviyelerine gerilemiştir. Yıllık toplam değerlere bakıldığında, sistemin 790.437 kWh üretim ile toplam 2.413.513 kWh tüketimin yaklaşık %32,75'ini karşıladığı belirlenmiştir. Bu sonuç, sistemin tüketimin yaklaşık üçte birini karşılayabildiğini ve özellikle yaz aylarında daha etkin bir performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Santrale Ait Üretim Tahmini ve Tüketim Değerlendirmesi

Ay	Tüketim (kWh)	Üretim Tahmini (kWh)	Tüketimi Karşılama Oranı (%)
Oca.25	194.608	33.562	17.25%
Şub.25	188.201	38.413	20.41%
Mar.25	216.591	61.515	28.40%
Nis.25	247.969	75.589	30.48%
May.25	154.733	89.966	58.14%
Haz.24	151.986	96.891	63.75%
Tem.24	234.907	97.782	41.63%
Ağu.24	258.571	89.869	34.76%
Eyl.24	164.865	75.883	46.03%
Eki.24	225.375	57.695	25.60%
Kas.24	174.608	40.154	23.00%
Ara.24	201.101	33.118	16.47%
Toplam	2.413.513	790.437	32.75%

AÇIKLAMA

STB Proje Kodu: 118095, PV Santraller İçin Standartlaştırılmış Risk Değerlendirme ve Sigorta Uyumlu Kalite Kontrol Yönteminin Geliştirilmesi adlı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1].<https://solar.huawei.com/-/media/Solar/attachment/pdf/au/service/commercial/SUN200050KTL%2060KTL%2065KTLM0%20User%20Manual%2025%2008%2021.pdf>
- [2].<https://solar.huawei.com/en-GB/download?p=%2F-%2Fmedia%2FSolar%2Fattachment%2Fpdf%2Feu%2Fdatasheet%2FSUN2000-50kTL-M3-Datasheet.pdf>

BÖLÜM 3

TEKSTİL VE DERİ SEKTÖRÜNDE BİYOPOLİMER KULLANIMI: AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Doç. Dr. Nevin ÇANKAYA^{1*}

Yaşasın ÖĞEN²

^{1*} Uşak Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Dişçilik Hizmetleri Bölümü, Uşak, Türkiye. Nevin.cankaya@usak.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-6079-4987>

² Uşak Üniversitesi, Uşak Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Polimer Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Uşak, Türkiye. e-posta: 2243057002@ogr.usak.edu.tr, orcid id <https://orcid.org/0009-0008-9324-3840>

1. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ

Bu çalışmada, biyopolimer bazlı malzemelerin tekstil ve deri sanayisinde kullanımı ve bu kullanıma bağlı olarak gelişen etkiler ve ortaya çıkan maliyet ile ekonomik getirilerine vurgu yapılmaktadır. Gelişen teknoloji ve sunduğu olanakların değerlendirmesi, avantaj ve dezavantajları ile tekstil ve derinin endüstriyel uygulamalarındaki etkileri biyopolimerler özelinde değerlendirilmiştir. Biyopolimer kullanımının çevresel ve ekonomik etkileri yapılan araştırmalarla sunulmuştur. Bu çalışmayla tekstil ve deri sanayisinde biyopolimerler kullanımının arttırılması ve uygulama sahasının genişletilmesi amaçlanırken, bu konudaki farkındalığın arttırılması hedeflenmektedir.

Önemli Noktalar:

- Tekstil sanayisinin günümüzdeki iplik ve işlem uygulamalarının belirtilmesi,
- Biyopolimerlerin tekstil ve deri sanayisinde uygulanabilirliğinin örneklem ile anlatılması,
- Biyopolimer malzemelerin kullanımının çevresel etkilerinin ortaya konulması,
- Ekonomik olarak biyopolimer malzeme kullanımının faydaları, getirileri ve ayrıca dezavantajlarının belirtilmesi hedeflenmiştir.

2. GİRİŞ

Biyopolimerler, canlı organizmalarda doğal olarak bulunan veya sentetik yollarla üretilen polimerlerdir. Bu polimerler genellikle biyolojik kaynaklıdır ve doğal polimerler olarak da bilinmektedir. Biyopolimerler, proteinler, karbonhidratlar, lipitler ve nükleik asitler gibi biyolojik moleküllerden oluşabilirler. Tıp, gıda sanayisi, tarım uygulamaları ve çevresel yönetim sistemlerinde kullanılan biyopolimerler ayrıca biyoteknolojik uygulamalarda da yerini almaktadır. Selüloz, kitin ve kitosan gibi doğal polimerler, malzeme mühendisliğinde, biyoaktif kaplama işlemlerinde, biyoçözünür film ve biyoaktif kaplama gibi birçok alanda aktif olarak kullanılmaktadır (Çankaya ve Sökmen, 2016). Ayrıca, polilaktik asit (PLA) gibi bazı sentetik biyopolimerler de, biyoplastikler ve medikal implantlar gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Biyopolimerlerin avantajları arasında, biyoçözünürlükleri ve biyoçeşitliliğe katkıda bulunmaları gibi çevresel faydalarının yanı sıra biyoyoumlu, biyoyoumluluk, biyobozunurluk ve biyodegradabilite gibi

biyolojik özellikleri de bulunmaktadır (Uner ve Kocak, 2012). Biyopolimerler biyolojik kaynaklardan elde edilebilen polimerler olup, bunların üretim yöntemleri elde edildikleri kaynağa ve polimerin özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Genel olarak biyopolimerler aşağıdaki yöntemlerle üretilirler (Hamamcı ve arkadaşları, 2018).

Doğal Kaynaklardan Üretim: Bazı biyopolimerler doğal kaynaklardan elde edilir. Örneğin, selüloz bitkilerden, kitin mantarlardan ve kabuklu deniz hayvanlarından elde edilir. Doğal kaynaklardan elde edilen biyopolimerlerin işlenmesi daha düşük maliyetli olabilir, ancak kaynakların sınırlı olması nedeniyle üretim miktarlarını da bu durum sınırlandırmaktadır.

Fermantasyon Yöntemi: Bazı biyopolimerler mikroorganizmaların fermantasyonu yoluyla üretilir. Bu yöntem, doğal kaynakların sınırlı olduğu durumlarda daha uygun olabilir. Fermantasyon yöntemiyle üretilen biyopolimerlere polilaktik asit (PLA) ve polihidroksibütirat (PHB) vb. örnek olarak verilebilir.

Biyosentetik Yöntem: Biyosentetik yöntem biyolojik organizmaların genetik olarak değiştirilmesiyle polimer üretimini sağlar. Bu yöntem özellikle biyopolimerlerin belirli özelliklerinin geliştirilmesi gerektiğinde kullanışlı olabilir. Örneğin, biyosentetik yöntemle üretilen poliesteramidler, daha yüksek mukavemet ve dayanıklılığa sahiptirler

Başka bir sınıflandırmayı ise şu şekilde yapabiliriz: Polisakkarit Bazlı Biyopolimerler: Selüloz ve Türevleri, Kitin ve Kitosan, Aljinat, Nişasta vb.. Protein Bazlı Biyopolimerler: Kollajen, Jelatin, Keratin, İpek Fibroin vb.. Mikrobiyal Kaynaklı Biyopolimerler: Polihidroksiialkanoatlar (PHA), Polihidroksibütirat (PHB), Bakteriyel Selüloz vb.. Biyobazlı Sentetik Polimerler: Polilaktik Asit (PLA), Polibütilen Süksinat (PBS), Polikaprolakton (PCL) vb.. (Niaounakis, 2015; Garrison ve arkadaşları, 2016; Thakur ve arkadaşları, 2018).

Biyobozunur polimerler canlının yaşam sürecinde canlı tarafından üretilen, organik yapıda polimerlerdir. Doğal olarak modifiye olmuş ya da genetik modifikasyon (mikrobik ve biyomonomer poliesterler, bakteri selülozu gibi) ile oluşmasının yanı sıra biyokütlesel yapılardan eldesi mümkündür (Kılınç ve arkadaşları, 2017; Dursun ve arkadaşları, 2010). Genel çerçevede sentez işlemi enzimle katalize edilmiş reaksiyonlar ve aktif hale gelmiş monomer yapılarla (hücre içi kompleks metabolik reaksiyonlar) zincir halinde

gelişimiyle olmaktadır. Protein yapısında olanlar (keratin, ipek, kolajen vb.) ve karbonhidratlar (nişasta, glikojen vb.) doğal polimerlere en genel örneklerdir. Bu maddeler kimyasal olarak inert, toksik olmayan ve tabiatta kolaylıkla bulunabilen çevre dostu polimerlerdir.

Polisakkaritler

Sanayide son zamanlarda daha aktif olarak kullanılmaya başlanan polisakkaritler en önemli biyopolimerlerdendir. Polisakkaritler, yenilenebilir olmaları, çevre dostu özellik göstermeleri ve biyolojik olarak parçalanabilmeleri nedeniyle tekstil ve deri sektöründe yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Selüloz, kitosan, nişasta ve aljinat gibi polisakkaritler; lif üretiminden yüzey ve kumaş modifikasyonuna, fonksiyonel kaplamalardan teknik tekstil ve boyama-terbiye işlemlerine kadar çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Klemm ve arkadaşları, 2005; Shen ve arkadaşları, 2010). Çeşitli mantar ve mayalardan elde edilen bu biyopolimerler, önemli ticari yapıya sahiptir. Polimer yapısında karbonhidrat olan polisakkaritler enerji depolamaktadırlar. Dallanmış ya da doğrusal yapıdaki basit şeker polimerleridir. O-glikozidik bağlarla bağlanmış olan monomer yapısındaki monosakkaridlerdir. Monosakkarit yapısındaki çözünürlük, jelleşme ve yüzey özellikleri gibi farklılıklar polisakkaritin fiziksel özelliklerini belirleyen önemli parametrelerdir. Nişasta ve selüloz en çok bilinen polisakkaritlerdir. Kovalent α -bağlı glikoz monomerleri nişastaları, kovalent β -bağlı glikoz monomerleri de selülozları oluşturur. İnsan sindirim sistemi α -bağlı yapıyı kırabilirken β -bağlı yapıları kıramaz. Nişasta insan vücudunda sindirilebilirken selüloz yapısı sindirilemez.

Tekstil endüstrisinde en yaygın kullanılan polisakkaritlerden biri selülozdur. Pamuk liflerinin temel yapısını oluşturan selüloz, aynı zamanda viskon, modal ve liyosel gibi rejeneratif liflerin üretiminde de ana hammaddestir. Selüloz esaslı lifler yüksek nem alma (absorpsiyon) kapasitesi, iyi hava geçirgenliği ve kullanıcı konforu sağlamaları nedeniyle giyim tekstillerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca biyolojik olarak parçalanabilir yapıları sayesinde sürdürülebilir tekstil üretimine katkı sağlamaktadırlar (Klemm ve arkadaşları, 2005; Khalil ve arkadaşları, 2012).

Kitosan ise tekstil yüzeylerine fonksiyonel özellik kazandırmak amacıyla kullanılan önemli bir polisakkarittir. Katyonik yapısı sayesinde bakteriyel

hücre yüzeyleri ile etkileşime girerek mikroorganizma gelişimini baskılayabilmekte ve böylece kumaşlara antimikrobiyal özellik kazandırabilmektedir. Bu nedenle kitosan uygulamaları özellikle medikal tekstillerde, yara örtülerinde, spor kıyafetlerinde ve hijyen amaçlı ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Lim ve Hudson, 2004; Islam ve arkadaşları, 2019).

Polisakkaritlerin tekstildeki bir diğer kullanım alanı boyama ve baskı işlemleridir. Özellikle aljinat ve nişasta türevleri, baskı patlarının hazırlanmasında kıvamlaştırıcı olarak görev yapmakta ve boyarmaddelerin kumaş yüzeyine daha kontrollü aktarılmasını sağlamaktadır. Bu özellikleri sayesinde baskı kalitesinin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadırlar (Shen ve arkadaşları, 2010). Bunun yanında polisakkarit bazlı kaplamalar kumaşlara ultraviyole koruma, antioksidan aktivite, nem yönetimi ve bazı durumlarda alev geciktirici özellikler kazandırabilmektedir (Roy ve arkadaşları, 2009).

Nişasta bitkisel kaynaklı bir polisakkarid (çoklu şeker molekülleri) ve temel yapı olarak glikozdan oluşur. Nişasta depo karbonhidratı olarak bitkilerin yapısında önemli bir bileşendir. Bitkilerde nişasta yaprak, gövde ve köklerde depolanabilir ve besin kaynağı olarak kullanılabilir. Nişastanın kimyasal yapıları, molekül ağırlığı ve kristal yapıları; bitki türüne, bitkinin büyüme koşullarına, nişastanın işlenme koşullarına ve nişastanın çıkarıldığı kaynaklara bağlı olarak değişebilir. Nişasta yapısal olarak amiloz ve amilopektin olarak bilinen iki farklı bileşenden oluşur. Amiloz lineer bir glikoz zinciri oluşturan düz bir molekül yapısına sahipken, amilopektin dallı bir yapıya sahip olan daha büyük ve daha karmaşık bir moleküldür. Nişastanın bu iki bileşeni özellikle pişirme ve işlenme sırasında farklı şekillerde davranırlar (Işıtan ve arkadaşları, 2022; Karakuş ve arkadaşları, 2021; Dağbağlı, ve Göksungur, 2005). Nişasta çeşitli endüstriyel uygulamalarda; gıda, kâğıt, tekstil, ilaç, kozmetik ve biyoenerji üretimi gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır. Nişastanın endüstriyel uygulamaları nişastanın kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Nişastanın özellikle jel oluşturma, su tutma ve stabilize etme gibi özellikleri, endüstriyel sahada uygulanabilirliğini sağlamaktadır. Ayrıca çevresel ortamın kirli olduğu durumlarda mikroorganizmalar nişastanın bileşenlerini sindirmeye başlar ve maddenin gözenekli bir yapıya dönüşmesine ve plastik matrisindeki durumun bozulmasına, kırılmasına ve küçük parçalara ayrılmasına neden olurlar (Karaoğlu ve Kotancılar, 1998). Doğal nişasta

kırılgan olup camsı geçiş sıcaklığının yüksek olması nedeniyle işlenmesi zordur. Bu durum nişasta makromoleküllerinin içyapısında bulunan ve diğer nişasta molekülüyle yaptığı hidrojen bağlarından kaynaklanmaktadır (Işıtan ve arkadaşları, 2022, Ölçer ve Akın, 2008).

Nanoteknolojideki gelişmeler polisakkaritlerin kullanım alanlarını daha da genişletmiştir. Özellikle kitosan ve selüloz nanokristalleri, nanolifler ve bakteriyel selüloz gibi nanoyapılı polisakkaritler; akıllı tekstiller, sensör sistemleri ve biyomedikal tekstil uygulamalarında dikkat çekmektedir. Bu malzemeler yüksek yüzey alanı ve geliştirilebilir mekanik özellikleri sayesinde yeni nesil fonksiyonel tekstiller için önemli bir potansiyel taşımaktadır (Moon ve arkadaşları, 2011; Thomas ve arkadaşları, 2018). Polisakkaritlerin çevresel uygulamalardaki önemi de giderek artmaktadır. Biyopolimer bazlı adsorbentlerin tekstil ve deri atık sularında bulunan boya moleküllerini ve (ağır) metalleri uzaklaştırılmada kullanıldığı bilinmektedir. Bu nedenle polisakkaritler yalnızca üretim süreçlerinde değil, sanayi kaynaklı çevresel problemlerin azaltılmasında da önemli bir role sahiptir (Crini ve Badot, 2008; Vakili ve arkadaşları, 2014).

3. TEKSTİL SANAYİSİ ve BİYOPOLİMER UYGULAMALARI

Tekstil endüstrisi, dünya ekonomisi için önemli bir rol oynamaktadır. Tekstil endüstrisi, doğal ve sentetik liflerin üretimi, dokuma, örme, boyama ve işleme süreçleri ile ilgilenen bir sektördür. Bu sektör, giyim, ev tekstili, endüstriyel kullanım, otomotiv, tarım ve inşaat gibi pek çok farklı endüstride kullanılan ürünlerin üretimini sağlamaktadır. İplik ve tekstil ürünleri, dünya genelinde birçok ülkede üretilmekte ve ihraç edilmektedir. Bu sektör, birçok kişiye istihdam sağlamakta olup, dünya genelinde ekonomik büyüme ve kalkınmaya katkıda bulunmaktadır. Tekstil endüstrisi üretim sürecinin tüm aşamalarında çevre dostu uygulamalar benimsemekle mükellef olup; atık yönetimi, su tüketimi ve enerji tüketimi konularında çeşitli gelişmeleri takip etmelidir ve etmektedir (Esi, 2017; Eser 2016).

2.1. Türkiye’de Tekstil Üretimi

Türkiye’de tekstil sektörü ülkenin en önemli sanayi dallarından biridir. Türkiye dünyada tekstil ve hazır giyim sektöründe önemli bir role sahip olup, ihracatta da önemli bir paya sahiptir (Bashimov, 2017). Türkiye coğrafi

konumu, nüfus yapısı, işgücü maliyetleri ve üretim kalitesi açısından tekstil sanayisi için oldukça uygun bir ülkedir. Türk tekstil sanayisi, özellikle son yıllarda yaptığı yatırımlarla ve teknolojik gelişmelerle dünya pazarında rekabet gücünü artırmıştır. Türkiye'nin tekstil ihracatı, özellikle Avrupa Birliği ülkeleri, Orta Doğu ve Kuzey Afrika gibi yakın coğrafyalara yapılan ihracatla büyük ölçüde artmıştır. Türkiye'deki tekstil sanayisi, hazır giyim, ev tekstili, teknik tekstiller, endüstriyel tekstiller ve nakış işleme gibi birçok alt sektörü kapsar. Türkiye'de tekstil sektörü, işsizlik oranlarının azaltılması, ekonomik büyümenin desteklenmesi ve ihracat gelirlerinin artması gibi pek çok avantaj sağlamaktadır. Ayrıca Türk tekstil sanayisi, sosyal sorumluluk anlayışı ile hareket ederek, çevre dostu üretim ve insan haklarına saygı gibi konulara da önem vermektedir (Uyanık ve Çelikel, 2019; Esi, 2017; Uğur, 2004).

2.2. Tekstil Sanayisinde İplik Üretimi

İplik üretimi tekstil endüstrisinin önemli bir aşaması olup, doğal veya sentetik liflerin çeşitli yöntemlerle bir araya getirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. İplik üretimi yün, pamuk, ipek, keten, rayon, naylon ve polyester gibi birçok malzemeden yapılabilmektedir. İplik üretimi iki temel yöntemle gerçekleştirilir: Ring iplik ve açık uçlu iplik. Ring iplik, en yaygın yöntemdir ve yüksek hızda dönen bir iğne yardımıyla ipliğin sıkılaştırıldığı bir yöntemdir. Açık uçlu iplik ise, ipliğin atıldığı bir hava akışı yardımıyla oluşan bir yöntemdir. İplik üretiminde kullanılan diğer önemli teknolojiler arasında kesikli iplik, rotor iplik ve havlı iplik sayılabilir. Bu yöntemler iplik üretiminde farklı malzemelerin kullanılmasına ve farklı özelliklere sahip ipliklerin üretilmesine olanak tanır. İplik üretimi liflerin birleştirilmesi ve bükülmesi yoluyla gerçekleştirilir. Doğal lifler bitki veya hayvan kaynaklı olabilir; örümcek ipliği gibi diğer kaynaklar da mevcuttur.

İplik üretiminde kullanılan sentetik lifler petrol türevi polimerlerden elde edilir.

İplik üretimi uzun bir süreçtir ve aşağıdaki adımları içerir:

1. Kumaş yapımında kullanılan malzemelerin seçimi
2. Liflerin hazırlanması
3. Liflerin temizlenmesi
4. Liflerin taranması
5. Liflerin birleştirilmesi ve eşitlenmesi
6. İpliklerin bükülmesi ve çekilmesi

7. İpliklerin sarılması ve paketlenmesi (Ersoy ve Şenol, 2017; Buharalı Ömeroğlu, 2013).

2.2.1. İplik Türleri

İplikler doğal ve sentetik olmak üzere üretilebilmektedir. Doğal iplikler daha çok tarımsal ürünlerden elde edilen iplik türleridir. Doğal iplik türlerini aşağıdaki gibi sınıflayabiliriz.

Pamuk İpliği: Pamuk bitkisinden elde edilir. Doğal pamuk ipliği yumuşaktır, nemi emer ve nefes alabilen bir özelliğe sahiptir.

Yün İpliği: Koyun, keçi, deve, tavşan gibi hayvanların yününden elde edilir. Sıcak tutma özelliği nedeniyle özellikle kış aylarında kullanılan popüler bir iplik türüdür.

İpek İpliği: İpek böceğinin kozasından elde edilir. İpek iplikleri parlak ve pürüzsüz bir yapıya sahiptir ve hafiftir.

Keten İpliği: Keten bitkisinden elde edilir. Keten iplikleri güçlüdür, hava alır ve nem emer.

Hasır İpliği: Hasır bitkisinden elde edilir. Hasır iplikleri dayanıklıdır ve sert yapıdadır.

Jüt İpliği: Jüt bitkisinden elde edilir. Jüt iplikleri dayanıklı, doğal bir yapıya sahiptir ve çevre dostudur.

Merserize Pamuk İpliği: Pamuk ipliğinin işlemlerden geçirilmesiyle elde edilir. Parlak bir görünüme ve dayanıklılığa sahiptir.

Sentetik iplikler de özellikle polimer bazlı malzemelerden üretilen, kullanım alanı geniş iplik türleridir. Bunları da şu şekilde sınıflayabiliriz:

Naylon İplik: Petrol türevlerinden elde edilir. Naylon iplikleri dayanıklı, hafif ve esnektir.

Polyester İplik: Petrol türevlerinden elde edilir. Polyester iplikleri dayanıklı, hafif ve nem emici özelliklere sahiptir.

Akrilik İplik: Akrilonitril olarak bilinen bir monomerden elde edilir. Akrilik iplikleri hafif, sıcak tutar ve kolay bakım sağlar.

Rayon İplik: Ahşap hamuru veya bitkisel selülozdan elde edilir. Rayon iplikleri yumuşak, nem emici ve hava geçirgenliği yüksektir.

Elastan İplik: Poliüretan olarak bilinen bir polimerden elde edilir. Elastan iplikleri çok esnektir ve kumaşlara esneklik katmak için kullanılır.

Polipropilen İplik: Petrol türevlerinden elde edilir. Polipropilen iplikleri dayanıklı, hafif ve serttir.

Modakrilik İplik: Akrilik ve diğer polimerlerin bir karışımından elde edilir. Modakrilik iplikleri akrilik iplikleri gibi özelliklere sahiptir ancak daha alev geciktirici yapıdadır. (Akbulut ve Bulut, 2015).

2.2.2. Biyopolimer Bazlı İplik Türleri

Biyopolimer bazlı iplik üretiminde kullanılan maddeler, doğal kaynaklardan elde edilen polimerler ve biyolojik olarak parçalanabilen sentetik polimerler gibi farklı tiplerde olabilmektedir. Bazı yaygın biyopolimer bazlı iplik üretim malzemeler aşağıda verilmiştir (Hamamcı ve arkadaşları, 2018; Eser 2016; Yoruç ve Uğraşkan, 2017; Younes, 2016; Akbulut ve Bulut, 2015):
Selüloz: Selüloz, bitkilerde bulunan bir polisakkarittir ve yaygın olarak pamuk, keten, kenevir ve bambu gibi bitkilerden elde edilir. Selüloz bazlı iplikler, pamuklu iplikler gibi yumuşak ve nefes alabilen bir doku üretir.

Mısır Nişastası: Doğal bir polimer olan mısır nişastasından üretilen iplikler, polyester ipliklere benzer bir görünüme sahip olabilmektedir.

Süt Proteinini: Süt proteinini, süttten elde edilen bir polimerdir. Süt proteinini bazlı iplikler, yumuşak ve esnek bir dokuya sahiptir.

Soya Proteinini: Soya proteinini, soya fasulyesinden elde edilen bir polimerdir. Soya proteinini bazlı iplikler, polyester ipliklere benzer bir görünüme sahiptir.

Polilaktik Asit (PLA): Polilaktik asit, mısır nişastasından veya şeker kamışından elde edilen bir sentetik polimerdir ve biyolojik olarak parçalanabilir. PLA bazlı iplikler, polyester ipliklere benzer bir görünüme sahiptir.

Polikaprolakton (PCL): Polikaprolakton, sentetik bir polimer olup, biyolojik olarak parçalanabilir. PCL bazlı iplikler, yumuşak ve esnek bir dokuya sahiptir.

Kitosan: Kitinin deasetillenmesiyle elde edilen kitosan, toksik özelliğinin olmaması, biyolojik olarak parçalanabilir olması, biyoyumlu olması, kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından diğer biyopolimerlere göre üstün özellikler göstermesini sağlamaktadır. Birçok endüstri dalında kullanıldığı gibi tekstil endüstrisinde de kullanılan bir biyopolimerdir (Elamri ve arkadaşları, 2023; Çankaya ve Sökmen, 2016).

Bu türler sadece bazı örnekler olup, biyopolimer bazlı iplik üretimi için kullanılan malzemeler sürekli olarak araştırılmakta ve geliştirilmektedir.

2.3. Biyopolimerden Üretilen Kumaşların Kullanım Alanları

Biyopolimer bazlı kumaşlar, biyolojik olarak parçalanabilen veya geri dönüştürülebilir hammaddelerden yapılan kumaşlardır. Bu nedenle sürdürülebilir moda trendlerinde giderek daha fazla popüler hale gelmektedirler. Bu kumaşların kullanım alanları aşağıdaki gibi sınıflanabilir (Aydın, 2021; Berber ve Keskin, 2021; Ergin, 2020; Can ve Ayvaz, 2017; Yoruç ve Uğraşkan, 2017).

Giyim: Biyopolimer bazlı kumaşlar, giyim sektöründe kullanılabilen birçok farklı malzemeden yapılabilen kumaşlardır. Örneğin, mısır nişastası, bambu, keten, soya fasulyesi ve kenevir gibi malzemelerden üretilen biyopolimer bazlı kumaşlar, özellikle tişört, elbise, pantolon, ceket ve iç çamaşırı gibi giyim ürünlerinde kullanılmaktadır.

Ev Tekstili: Biyopolimer bazlı kumaşlar yatak örtüleri, yastık, perde ve diğer ev tekstili ürünlerinin yapımında kullanılmaktadır. Bu kumaşlar, doğal olarak nefes alabilen ve antimikrobiyal özelliklere sahip oldukları için, ev tekstili ürünleri için idealdirler.

Sağlık Sektörü: Biyopolimer bazlı kumaşlar sağlık sektöründe de kullanılabilen birçok farklı malzemeden yapılabilir. Örneğin antibakteriyel özelliklere sahip olan bu kumaşlar, cerrahi örtüler, maske ve eldiven gibi ürünlerde kullanılabilir.

Otomotiv Endüstrisi: Biyopolimer bazlı kumaşlar otomotiv endüstrisinde kullanılabilecek birçok farklı malzemeden yapılabilir. Örneğin, araç içi döşeme malzemeleri, koltuk kaplamaları ve direksiyon kaplamaları gibi ürünlerde kullanılabilirler.

Spor Ekipmanları: Biyopolimer bazlı kumaşlar, spor ekipmanlarının yapımında kullanılabilmektedir. Bu kumaşlar nemi emen ve hava akışını sağlayan özelliklere sahip olduğundan sporcu kıyafetleri, ayakkabı ve çanta gibi ürünlerde kullanılabilmektedir.

2.4. Biyopolimerler İplik ile Kumaş Üretilmesinin Avantajları

Biyopolimer kullanımı, özellikle kaynakların tükenmeye başlaması ve daha yenilikçi, çevreci ve sağlıklı ürünlerin arayışında öne çıkmaktadır. Tekstil

sanayisinde kullanılan doğal ve sentetik ürünlere nazaran biyobozunur yapıda olması ve daha az biyobirikime neden olmasından dolayı tercih edilmeye başlanmıştır. Bu anlamda sağlayacağı en önemli avantajlardan biri insan sağlığına biyoyumlu olması açısından diğer petrokimya ürünlerine nazaran daha az zararlı olduğunu söyleyebiliriz. Biyopolimer kullanımı ile iplik üretimi sürecinde daha sürdürülebilir bir yaklaşım benimsenmekte ve çevresel etki azaltılmaktadır. Kullanılan biyopolimerin türüne göre yüksek dayanıklılık, nem direnci ve esneklik sağlayabilmektedir. Ayrıca doğal hammaddeler ile üretilen iplik arasında biyopolimer kullanılarak ipliklerin daha dayanıklı hale getirilmesi de mümkündür. Böylece maddi anlamda sürdürülebilir bir yaklaşım ortaya çıkmaktadır. İplik sanayisinin girdi maliyetlerindeki bu azalış, özellikle ihracat yapan firmaların kar oranlarını artırmasını ve bu da ülke ekonomisinin artışına imkân sağlayacaktır (Ergin, 2020; Akbulut ve Bulut, 2015).

2.4.1. Biyopolimerin İplik Kalitesi Açısından Avantajları

Biyopolimerlerin iplik üretiminde kullanımı, doğru şekilde işlendiklerinde yüksek kaliteli iplik üretimine imkân tanır. Biyopolimerlerin ipliklerin yumuşaklığına ve esnekliğine katkıda bulunabilecek doğal özellikleri vardır. Örneğin, selüloz bazlı biyopolimerlerin doğal nemlendirme özelliği sayesinde iyi bir iplik eldesi mümkündür. Ayrıca biyopolimerlerin doğal renkleri ipliklere farklı bir görünüm sağlayarak, boyama işlemine gerek kalmadan kullanılması sağlanabilir.

Biyopolimerlerin iplik kalitesine etkisi, malzemenin özelliklerine ve kullanılan üretim yöntemine bağlıdır. Biyopolimerin üretimi sırasında uygulanan işlem ve kullanılan kimyasallar ipliğin kalitesini etkileyebilir. Kullanılan biyopolimerin türü ve özelliği ipliğin dayanıklılığı, elastikiyeti ve diğer fiziksel özellikleri üzerinde de etkilidir. Örneğin mısır nişastasından elde edilen polilaktik asit (PLA) biyopolimeri iyi bir iplik yapısına sahiptir ve tekstil endüstrisinde kullanılmaktadır (Çelen ve Koçer, 2022; Ergin, 2020; Ersoy ve Şenol, 2017).

2.4.2. Biyopolimer İpliğin İnsan ve Çevre Sağlığı Açısından Avantajları

Biyopolimerler, iplik ve kumaş üretiminde kullanıldıklarında insan ve çevre sağlığı açısından birçok avantaj sağlamaktadır. Doğal kaynaklardan elde

edildikleri için biyopolimerlerin üretimi çevre dostudur. Petrol gibi sınırlı kaynakları tüketmek yerine, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen Biyopolimer kullanım yaygınlaşacaktır. Biyopolimerlerin üretimi sırasında sera gazı emisyonu düşük olduğundan atmosferdeki karbon dioksit seviyelerini azaltmaya yardımcı olur. Biyopolimerler doğal olarak çevreye zarar vermeyen malzemelerdir. Doğada kolaylıkla bozunabilir, toprakta veya suyun içinde kolayca ayrışabilirler. Biyopolimerler insan sağlığına zararlı olabilecek kimyasallar içermezler. Biyopolimerlerin üretimi sırasında enerji tüketimi de daha düşüktür. Bu da enerji tasarrufu sağlar ve çevre üzerindeki etkilerini azaltır (Çoban, 2015). Biyopolimerler petrokimya kaynaklı polimerlerde olduğu gibi ağır metaller veya toksik kimyasallar içermez. İnsan sağlığını tehdit eden bir yapıda değildir. Biyopolimerlerden yapılmış iplik ve kumaşlar, boyama işlemlerinde daha renk haslığına sahip olur ve baskı ve boyama açısından önemli avantajlar sağlar. Doğada bol miktarda bulunan kitosan biyopolimeri canlı yapısını tehdit edecek toksik yapıda değildir. Bu açıdan bakıldığında diğer biyopolimerlere göre üstün özellikler göstermektedir. Tekstil endüstrisi için uygun bir yapıya ve kullanılabilirliğe sahiptir (Hamamcı ve arkadaşları, 2018; Türemen ve Demir, 2017).

Biyopolimerler, antibakteriyel özelliklere de sahip olabilirler. Bu özelliğiyle sağlık sektöründe kullanıldığında hijyenik ve sağlıklı bir ortam sağlar. Yapılan çalışmalarda, kitosanın tekstil ipliklerinde kullanım potansiyeli ve antibakteriyel etkinliği araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kitosan ve nanokitosan ile muamele edilen pamuklu kumaşların, özellikle asidik pH koşullarında, kitosan kaplı yüzeylerin katyonik karakteri sayesinde yüksek düzeyde antibakteriyel aktivite sergilediğini göstermiştir. Bu etkinin, pozitif yüklü kitosan zincirlerinin mikroorganizmaların negatif yüklü hücre zarlarıyla etkileşime girerek hücre bütünlüğünü bozmasından kaynaklandığı bildirilmektedir (Lim ve Hudson, 2004; El-Tahlawy ve arkadaşları, 2005; Islam ve arkadaşları, 2019). Bu, bulk kitosan parçacığının yüksek yüzey enerjileri ve viskoziteleri nedeniyle fiber yüzeye sıkıca bağlanamadığı kavramını doğrular. Öte yandan, kitosan nanopartikülleri yüksek yüzey alanına sahiptir ve bulk kitosana kıyasla yıkama döngülerinden sonra serbest hale geçmemiştir. Ayrıca, nanokitosanın bakteriyel hücre zarına ozmozunu güçlü olup kumaş yüzeyi üzerinde daha fazla antibakteriyel etki göstermiştir (Tüylek, 2020; Demir ve arkadaşları, 2008).

Yengeç, karides ve ıstakoz gibi kabuklu deniz canlılarının dış iskelet yapısı temel olarak kitin, proteinler ve çeşitli mineral bileşenlerden (özellikle kalsiyum karbonat ve kalsiyum fosfat) oluşmaktadır. Bu canlılarda bulunan proteinlerin bir kısmı alerjen özellik gösterebildiğinden, özellikle biyomedikal uygulamalarda yüksek saflıkta kitin veya kitosan elde edilebilmesi için proteinlerin ortamdan uzaklaştırılması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla uygulanan deproteinizasyon işleminde, protein yapısındaki bağlar kimyasal yöntemlerle parçalanarak kitin matriksinden ayrılmaktadır. Ancak işlem sırasında kullanılan kimyasalların yalnızca proteinleri değil, aynı zamanda biyopolimer zincirlerini de etkileyerek depolimerizasyona neden olabilme riski bulunmaktadır. Bu nedenle deproteinizasyon koşullarının dikkatli bir şekilde optimize edilmesi, biyopolimerin yapısal bütünlüğünün korunması açısından kritik öneme sahiptir (Stoica ve arkadaşları, 2020; Türemen ve Demir, 2017; Üçgül ve arkadaşları, 2016; Demir ve arkadaşları, 2008).

2.4.3. Biyopolimer İpliğin Ekonomik Açıdan Avantajları

Biyopolimer üretiminde petrokimya ve ana tarımsal ürünlerin kullanılması yerine, bazı tarımsal ürün atıklarının kullanılması mevcuttur. Atık ürünlerin kullanılmasıyla elde edilen biyopolimerler ve bu biyopolimerlerden üretilen iplik ve kumaşlar maddi açıdan avantaj sağlayacaktır. Bazı tarımsal ürünlerin atıklarının kullanılmasıyla üretilen biyopolimerlerin iplik ve dolayısıyla kumaş üretiminde kullanılması petrokimya ve ana tarımsal ürünlerin kullanılmasını azaltarak, maddi yönden büyük avantaj sağlamanın yanı sıra ülke ekonomisine de katkı sağlayacaktır. Ayrıca enerji kullanımının da azaltılmasının sağlanması maliyetleri de azaltacaktır. Tüketicilerin çevre dostu ürünlere olan talebi arttıkça, biyopolimer malzemelerden yapılmış iplikler gibi çevre dostu ürünlerin pazarlama avantajı oluşacaktır. Bu da biyopolimer ipliklerin satışını arttıracak ve şirketler için ekonomik fayda sağlayacaktır (Hamamcı ve arkadaşları, 2018; Akbulut ve Bulut, 2015).

2.5. Biyopolimer İplik ile Kumaş Üretiminin Dezavantajları

Biyopolimerlerin iplik üretiminde kullanımı iplik kalitesine farklı şekillerde etki etmektedir. Biyopolimerler türüne göre, yüksek nem emme (absorpsiyon) kapasitelerine sahip olabilirler, bu nedenle nemli koşullarda kullanıldıklarında iplikler daha az dayanıklı olabilir. Ayrıca, biyopolimerlerin

yüzey yapısı, işlem sırasında iplik kalitesini etkileyebilir. Bazı biyopolimerler, düzgün bir yüzeye sahip olmayabilirler ve bu da iplik üretiminde ipliğin düzgün bir şekilde çekilmesini zorlaştırabilir (Ergin, 2020; Hamamcı ve arkadaşları, 2018).

2.5.1. Biyopolimer İpliğin Tekstil Sanayisinde Kullanımının Dezavantajları

Biyopolimer iplik üretimi ve endüstride kullanılması bazı sıkıntılar oluşturabilir ve dezavantajlarını da beraberinde getirebilir:

Üretim Süreçleri: Biyopolimer ipliklerinin üretimi geleneksel polimerlerin üretiminden daha karmaşık bir süreç gerektirir. Bu nedenle üretim maliyetleri de daha yüksek olabilir. Ayrıca üretim süreci sırasında kullanılan enzimler ve diğer kimyasalların doğru şekilde kullanılmaması ürün kalitesini olumsuz etkileyebilir.

Dayanıklılık Sorunu: Biyopolimerlerin genellikle geleneksel polimerlere kıyasla daha az dayanıklı olduğu bazı çalışmalarda görülmektedir. Bu nedenle her endüstriyel kullanım için biyopolimer uygun olmayabilir, bu da kısıtlı ürün seçeneği sunar. Dayanıklılık sorunu, çeşitliliği azaltan bir sorun olarak değerlendirilebilir.

Piyasa ve Tüketici Tercihleri: Biyopolimer ipliklerin kullanımı henüz piyasada yaygın olarak kabul görmemiştir. Bu nedenle endüstriyel tüketici talebi de yetersiz kalmaktadır. Tüketicilerin biyopolimer ürünlere olan taleplerinin henüz yeterince gelişmemiş olduğu söylenebilir.

Ham Madde Kaynakları: Biyopolimerler biyolojik kaynaklardan elde edildiği için hammaddelerin temini ve fiyatı bazen dalgalanabilir. Bu dalgalanmalar beraberinde son kullanıcıda fiyat farklılıklarına yol açabilir ve tercih edilebilirliğini düşürebilir. Ayrıca hammaddelerin elde edilmesi sırasında çevresel etkilerin olacağı göz ardı edilmemelidir.

Geri Dönüşüm ve Bertaraf: Biyopolimer ipliklerin büyük kısmı geri dönüşümlü değildir ve çoğunlukla doğada çözünürler. Doğal çözünürlükleri bazen istenmeyen sonuçlara yol açabilir. Biyopolimer ürünlerin bertarafı geleneksel polimerlere kıyasla daha zor olabilir (Jahandideh ve arkadaşları, 2021; Köksal ve arkadaşları, 2019; Younes, 2016).

2.5.2. Biyopolimer İpliğin Ekonomik Açıdan Dezavantajları

Biyopolimer bazlı iplik üretimi, yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynak kullanımı açısından önemli avantajlar sunmasına rağmen bazı teknik ve ekonomik sınırlamalara da sahiptir. Biyopolimerlerden elde edilen ipliklerin mekanik dayanımı ve kullanım ömrü çoğu durumda petrokimyasal kökenli sentetik liflere kıyasla daha düşüktür. Bunun temel nedeni biyopolimerlerin doğal yapılarından kaynaklanan nispeten düşük mukavemet ve kırılabilirlik özellikleridir. Bu durum, ürünlerin kullanım süresinin kısalmasına ve dolayısıyla daha sık yenilenme gereksinimine yol açabilmektedir. Ayrıca biyopolimer esaslı ipliklerin üretim maliyetleri; hammadde temini, işleme süreçleri, enerji tüketimi ve işçilik giderleri gibi faktörlerden dolayı sentetik alternatiflere göre daha yüksek olabilmektedir (Hamamcı ve arkadaşları, 2018).

Biyopolimerlerin tekstil sektöründeki kullanımını sınırlandıran bir diğer önemli unsur ise her biyopolimer türünün iplik üretimine uygun olmamasıdır. Günümüzde birçok biyopolimerin tek başına iplik formunda işlenmesi ve endüstriyel ölçekte kumaş üretiminde kullanılması hâlen gelişim aşamasındadır. Bu nedenle biyopolimerler çoğunlukla sentetik veya doğal liflerle karıştırılarak kompozit iplik yapılarında kullanılmaktadır. Her ne kadar bu yaklaşım maliyetlerin azaltılmasına katkı sağlasa da, üretim hatlarının uyarlanması, yeni ekipman yatırımları ve proses optimizasyonu gibi ilave maliyetleri de beraberinde getirmektedir. Ayrıca biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bazı biyopolimerlerin tekstil sektöründe yüksek miktarlarda kullanılması, hammadde arzında kısıtlamalara neden olabilmekte ve üretim kapasitesinin artırılmasına yönelik ek yatırımları gerekli kılabilmektedir. Bu nedenle biyopolimer bazlı ipliklerin yaygınlaşabilmesi için maliyet etkin üretim yöntemlerinin geliştirilmesi ve endüstriyel ölçeklendirme çalışmalarının artırılması büyük önem taşımaktadır (Stoica ve arkadaşları, 2020; Ergin, 2020; Ersoy ve Şenol, 2017; Younes, 2016).

2.6. Tekstil Sanayisinde Çevresel Açıdan Bazı Sorunlar

Türk tekstil sanayisi ülkemizin önemli sektörlerinden biridir. Ancak üretim süreci sırasında doğal kaynakların tüketimi, atık üretimi ve çevre kirliliği gibi birçok çevresel sorun da beraberinde gelmektedir. Bu nedenle tekstil sanayisi çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir alandır ve bu alandaki sorunlar hakkında farkındalık oluşturmak oldukça önemlidir (Alkaya

ve Demirer, 2014). Türk tekstil sanayisinin çevresel sorunları arasında en önemlileri şu şekilde sınıflanabilir:

Su Kirliliği: Türk tekstil sanayisi su tüketimi yüksek bir sektördür. Boyama, baskı ve yıkama işlemleri sırasında kullanılan kimyasallar, boyalar ve diğer malzemeler su kirliliğine neden olabilir. Ayrıca fabrikalardan gelen atık sular da çevre kirliliğine yol açabilir (Kalaycı ve Çağlar, 2021).

Enerji Tüketimi: Türk tekstil sanayisi yüksek enerji tüketimi gerektiren bir sektördür. Bu nedenle fosil yakıtların kullanımı ve sera gazı emisyonları ile ilgili çevresel sorunlarla karşı karşıya kalınabilir (Çoban, 2015).

Atık Yönetimi: Türk tekstil sanayisi yüksek miktarda atık üreten bir sektördür. Bu atıklar arasında kimyasallar, boya ve diğer endüstriyel atıklar bulunur. Atıkların yönetimi ve bertarafı çevresel açıdan büyük önem taşımaktadır.

Sürdürülebilir Tarım: Türk tekstil sanayisi doğal liflerin yanı sıra sentetik lifler de kullanır. Doğal liflerin üretimi çevre dostu olmakla birlikte önemli ölçüde bir tarımsal üretimi kapsamaktadır. Bu çerçevede tarıma destek verilerek çevre temizliği ve insan sağlığı açısından önemli bir yol kat edilebilir. Fakat tarımsal üretimin endüstriyel çerçevede ilerlemesi yanlış politikalar ve yönlendirmeler ile hem gıda problemlerine hem de çevresel sorunlara yol açabilir. Bu nedenle doğru uygulamalar sürdürülebilirlik açısından son derece elzemdir (Akdoğan, 2021; Baran ve arkadaşları, 2021).

Sera Gazı Emisyonları: Türk tekstil sanayisi sera gazı emisyonlarının önemli bir kaynağıdır. Üretim sürecinde kullanılan enerjinin çoğu fosil yakıtlardan elde edilir ve bu da sera gazı emisyonlarına neden olur. Türk tekstil sanayisi sera gazı emisyonlarını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş sağlamaktadır (Baran ve arkadaşları, 2021; Erdoğan, 2020).

4. DERİ SANAYİSİ VE BİYOPOLİMER UYGULAMALARI

Türkiye dünyanın en büyük deri üreticileri arasında yer almaktadır ve deri sektörü ülke ekonomisi için önemli bir yere sahiptir. Türkiye'deki deri sanayisi deri üretimi, işlenmesi ve pazarlanması konusunda oldukça gelişmiştir ve sektörde birçok firma bulunmaktadır (Akçacı, 2021).

Türkiye'deki deri üretiminin büyük bir bölümü İstanbul, Bursa, İzmir, Denizli, Gaziantep ve Adana gibi büyük şehirlerde gerçekleştirilmektedir (Doldur ve Kartal, 2022). Bu şehirlerde büyük ve modern deri üretim tesisleri

bulunmaktadır. Türkiye'deki deri sektörü ayakkabı, giyim, aksesuar, mobilya ve otomotiv endüstrilerine hizmet vermektedir. Türkiye'deki deri sanayisi sığır, koyun, keçi ve deve gibi hayvanlardan elde edilen derileri işlemektedir. Türkiye'de genellikle sığır derisi daha fazla kullanılmaktadır. İşlenen deriler, dünya standartlarında kaliteli ürünler haline getirilmekte ve birçok ülkeye ihraç edilmektedir. Türkiye'deki deri sektörü ülkede önemli bir istihdam kaynağıdır. Sektörde çalışanların çoğunluğu üretim ve işleme işleriyle ilgilenmektedir. Ayrıca sektörde tasarım, satış ve pazarlama gibi farklı pozisyonlarda da iş imkânları bulunmaktadır. Deri sektörü dünya genelinde rekabetçi bir konuma sahiptir ve Türkiye'deki deri ürünleri dünya genelinde birçok ülkeye ihraç edilmektedir (Tozun ve Çınar, 2022; Akçacı, 2021; Bashımov, 2019; İstanbul Sanayi Odası, 2015).

3.1. Deri Tabaklama İşlemi

Deri tabaklama işlemi derinin dayanıklılığını artırmak, bozulmaya karşı direncini artırmak ve kullanım ömrünü uzatmak amacıyla yapılan bir işlemdir. Bu işlem derinin doğal yapısını değiştirerek kimyasal olarak sabit hale getirir. Deri tabaklama işlemi genellikle hazırlık, tabaklama ve bitirme olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır (Megep, 2011).

Hazırlık aşaması; derinin yağ, kir ve diğer yabancı maddelerden arındırılması işlemidir. Bu aşamada deri yıkanır, haşlanır ve bazen dezenfekte edilir. Tabaklama aşaması; derinin dayanıklılığını artırmak için kimyasal işlemler yapılması aşamasıdır. Bu işlemler derinin doğal proteinlerini sabitlemek için krom, alüminyum, titanyum ve diğer metal tuzları gibi kimyasallar kullanılarak yapılır. Tabaklama işlemi derinin suya dayanıklı hale getirilmesini ve çürümeye karşı korunmasını sağlar. Bitirme aşaması ise; derinin görünümünü ve hissini iyileştirmek için yapılan bir işlemdir. Bu aşamada deri boyanır, cilalanır, parlatılır ve istenen şekilde işlenir. Deri tabaklama işlemi insanlık tarihi boyunca uygulanmış ve geliştirilmiş bir işlemdir. Modern teknoloji sayesinde deri tabaklama işlemi daha hızlı ve verimli hale gelmiştir ancak temel prensipleri hala aynıdır (Dilek, 2017; İstanbul Sanayi Odası, 2015).

3.1.1. Deri Tabaklamada Kullanılan Klasik ve Modern Yöntemler

Klasik deri tabaklama yöntemleri şu şekilde sınıflanabilir:

Tuzlama: İlk adım olarak deri tuzlu suya batırılır ve tuz deriye nüfuz eder. Bu işlem deriyi temizler ve kurutur.

Tütsüleme: Deri tütsülenerek veya dumanla işlenerek koruyucu bir tabaka kazandırılır. Bu işlem aynı zamanda deriyi renklendirir.

Emprenye Etme: Emprenye işlemi deriye kimyasal madde uygulayarak deriyi korur ve dayanıklılık kazandırır. Emprenye işlemi için genellikle krom metali kullanılır.

Yağlama: Yağlama işlemi deriye yağ uygulayarak esneklik kazandırır ve suya dayanıklı hale getirir. Bu işlem genellikle bitkisel yağlar kullanılarak yapılır.

Boyama: Derinin renklendirilmesi için boyama işlemi yapılır. Boyama işlemi deriye istenilen renk ve görünümü kazandırmak için kullanılır. Boyama işlemi için doğal veya sentetik boyalar kullanılmaktadır.

Bu işlemler klasik deri tabaklama yöntemleridir. Günümüzde ise daha modern teknolojiler kullanılarak daha hızlı ve etkili deri tabaklama işlemleri yapılabilmektedir (Tozun ve Çınar, 2022; Megep, 2011).

Bazı modern deri tabaklama yöntemleri ise şu şekilde sınıflanabilir:

Krom tabaklama: Krom tabaklama günümüzde en yaygın kullanılan deri tabaklama yöntemidir. Krom tuzları kullanılarak yapılan bu yöntem deriyi dayanıklı, suya dayanıklı ve çeşitli renklerde boyanabilen bir ürün haline getirir.

Bitkisel tabaklama: Bitkisel tabaklama doğal bitki özleri kullanılarak yapılan bir yöntemdir. Bu yöntem deriyi dayanıklı ve uzun ömürlü hale getirir ancak krom tabaklamaya göre daha pahalıdır.

Aldehit tabaklama: Bu yöntem formaldehit veya glutaraldehit gibi kimyasallar kullanılarak yapılır. Aldehitler deriyi sertleştirir ve dayanıklı hale getirir ancak bu çevresel sorunlara neden olabilmektedir (Çavdar, 2014).

Sentetik tabaklama: Bu yöntem sentetik malzemeler kullanılarak yapılır. Sentetik tabaklama deriyi suya dayanıklı hale getirir ancak doku olarak doğal deri gibi hissettirmez.

Biyo-tabaklama: Bu yöntem enzim ve faydalı mikroorganizmalar kullanılarak yapılır. Biyo-tabaklama çevre dostu ve sağlıklı bir alternatiftir,

ancak krom tabaklamaya göre daha az dayanıklıdır. Kimyasal tabaklama süreçlerine kıyasla daha düşük çevresel etki oluşturmaları ve toksik atık miktarını azaltmaları nedeniyle sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bunun yanı sıra, bu yöntemle elde edilen derilerin mekanik dayanım ve uzun dönem performans özelliklerinin, özellikle krom tabaklama ile üretilen derilere kıyasla daha sınırlı olabildiği bildirilmektedir. Catalina ve arkadaşları (2012), deri atıklarının biyopolimer üretiminde değerlendirilmesine yönelik yaptıkları çalışmada, biyolojik temelli deri işleme yöntemlerinin çevresel açıdan önemli avantajlar sunmasına rağmen dayanıklılık bakımından geleneksel krom tabaklama sistemlerinin gerisinde kaldığını tespit etmişlerdir (Catalina ve arkadaşları, 2012).

Bu yöntemlerin her biri farklı avantaj ve dezavantajlar sunmakta olup kullanılacak yöntem derinin kullanım amacına, kalitesine ve fiyatına bağlı olarak değişim gösterebilmektedir.

3.2. Deri Tabaklamada Biyopolimer Kullanımı

Deri tabaklama endüstrisinde çevre dostu üretim teknolojilerine olan ilginin artmasıyla birlikte biyopolimerlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Geleneksel tabaklama işlemlerinde kullanılan bazı kimyasalların çevresel ve sağlık açısından oluşturduğu riskler, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen biyopolimerlerin alternatif olarak değerlendirilmesine yol açmaktadır. Bu kapsamda kollajen, jelatin, keratin, kitosan, aljinat ve bakteriyel selüloz gibi biyopolimerler deri işleme süreçlerinde sıklıkla kullanılan biyopolimerlerdir (Kanagaraj ve arkadaşları, 2006; Catalina ve arkadaşları, 2012). Kollajen ve jelatin, özellikle deri endüstrisi atıklarından geri kazanılarak yeniden tabaklama ve dolgu işlemlerinde kullanılabilir. Bu uygulamalar hem atık miktarının azaltılmasına hem de katma değerli ürünlerin elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Catalina ve arkadaşları, 2012). Kitosan ise biyobozunur yapısı, film oluşturma kabiliyeti ve antimikrobiyal özellikleri nedeniyle deri yüzey modifikasyonu, koruyucu kaplama ve fonksiyonel finisaj işlemlerinde tercih edilmektedir (Ali ve arkadaşları, 2014). Bunun yanında aljinat ve selüloz türevleri, deri yapısının iyileştirilmesi ve biyobazlı kaplama sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır.

Deri tabaklama işlemi deri üretiminde önemli bir adım olup çevreye zararlı kimyasallar içeren geleneksel deri tabaklama işlemi çevre dostu

biyopolimerlerin kullanımıyla değiştirilebilir. Doğal kaynaklardan elde edilen ve biyobozunur olan (biyolojik olarak parçalanabilir) biyopolimerler, deri tabaklamada kullanılan kimyasallara alternatif olarak kullanılabilirler. Biyopolimerler deri üretiminde birçok farklı şekilde kullanılabilir. Örneğin, deri tabaklama işlemi sırasında kullanılan formaldehit, krom ve diğer zararlı kimyasalların yerini alabilirler. Geleneksel deri tabaklama işleminin çevreye zararlı olduğu bilinmekte olup biyopolimerlerin kullanımı deri üretiminde daha sürdürülebilir bir yöntem sağlayabilir. Biyopolimerlerin kullanımı çevresel sürdürülebilirliği artırırken aynı zamanda üretim maliyetlerini de düşürebilir. Biyopolimerlerin deri tabaklama işleminde kullanımı henüz yaygın olamamakla birlikte bu alanda araştırmalar hala devam etmektedir. Biyopolimerlerin geliştirilmesi ve deri üretiminde kullanılması çevre dostu deri üretimi sağlamakta ve bu da tüketicilerin sürdürülebilir ve çevre dostu ürünlere olan taleplerini arttırmaktadır.

Deri tabaklama işleminde kullanılan biyopolimerleri protein bazlı, polisakkarit bazlı, mikrobiyal kökenli ve biyobazlı sentetik polimerler olarak 4 sınıfta gruplandırabiliriz. Protein bazlı biyopolimerler arasında kollajen, jelatin ve keratin yer almaktadır. Özellikle deri atıklarından geri kazanılan kollajen ve jelatin yeniden tabaklama ve dolgu işlemlerinde değerlendirilmektedir (Catalina ve arkadaşları, 2012). Polisakkarit kökenli biyopolimerler içerisinde kitosan, aljinat, selüloz türevleri ve nişasta öne çıkmaktadır. Bu biyopolimerler film oluşturma özellikleri, biyoyumlulukları ve antimikrobiyal etkileri nedeniyle deri yüzey işlemlerinde ve çevre dostu kaplamalarda kullanılmaktadır (Kanagaraj ve arkadaşları, 2006; Ali ve arkadaşları, 2014). Mikrobiyal kaynaklı biyopolimerler ise son yıllarda kullanılmakta olup bakteriyel selüloz, polihidroksialkanoatlar (PHA), polihidroksibütirat (PHB) ve mikrobiyal poliestерler buna örnek verilebilir. Ayrıca polikaprolakton (PCL), polilaktik asit (PLA) ve polibütilen süksinat (PBS) gibi biyobazlı sentetik polimerler, biyobozunur kaplamalar ve yapay deri üretiminde alternatif malzemeler olarak değerlendirilmektedir.

Ksantan Gam, deri tabaklama endüstrisinde kullanılan en sık biyopolimerlerden biri olup, özellikle sığır derisinde tabaklama işleminde kullanılmakta ve derinin mukavemetini arttırmaktadır. Kitosan, deriye su geçirmezlik özelliği kazandırmakta ve deri mukavemetini arttırmaktadır. Kitosanın deri tabaklama endüstrisinde kullanımı giderek artmaktadır. Selüloz

Eter, bitkilerden elde edilen bir biyopolimer olup deriye esneklik kazandırırken derinin mukavemetini de arttırmaktadır, deri tabaklamada kullanımı giderek artmaktadır. Hayvan dokularında bulunan bir protein olan kolajen, kimyasal tabaklama işlemlerinin çevresel etkilerini azaltırken aynı zamanda derinin dayanıklılığını da arttırmaktadır. Bitki hücre duvarlarında bulunan lignin, deri tabaklama işleminde kullanılmakta ve bazı kimyasalların yerini alacak çevre dostu bir biyopolimerdir (Ballús ve arkadaşları, 2022; Beghetto ve arkadaşları, 2017; Catalina ve arkadaşları, 2012).

Deri işleme sürecinden ortaya çıkan tabaklama atıkları, lif, jel, film ve sünger gibi farklı morfolojik yapılara sahip özel kolajen bazlı biyopolimerlere dönüştürülebilmektedir. Bu şekilde elde edilen biyopolimerler; kozmetik, farmasötik ve veterinerlik gibi alanlarda potansiyel uygulama değeri taşıyan, geliştirilmiş özelliklere sahip yenilenebilir malzemeler üretmek amacıyla çeşitli kimyasal modifikasyonlara tabi tutulmakta, özellikle çapraz bağlama gibi yöntemlerle fonksiyonel olarak iyileştirilmektedir (Ballús ve arkadaşları, 2022; Catalina ve arkadaşları, 2012). Bu biyopolimerlerin kullanımı deri endüstrisinde çevresel etkilerin azaltılmasına, atıkların değerlendirilmesi ve döngüsel ekonomi uygulamalarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Muthu, 2014; Coltelli ve arkadaşları, 2020).

Son yıllarda bakteriyel selüloz, polihidroksialkanoatlar (PHA) ve polihidroksibütirat (PHB) gibi mikrobiyal kaynaklı biyopolimerler de sürdürülebilir deri üretiminde öne çıkmaktadır. Bu biyopolimerler, biyobozunabilirlikleri ve düşük çevresel etkileri sayesinde krom bazlı işlemlere alternatif çevreci yaklaşımların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Muthu, 2014; Coltelli ve arkadaşları, 2020).

3.3. Deri Tabaklamada Biyopolimer Kullanımının Avantajları

Beghetto ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada, biyopolimerlerin deri tabaklamada kullanımı ve geleneksel yöntemle göre avantajlarını araştırmışlardır (Beghetto ve arkadaşları, 2017). Özellikle hayvansal kökenli atık biyokütlenin geri kazanılarak hidrolize kolajene dönüştürülmesi, bu materyalin daha sonra kimyasal modifikasyonlarla değerli biyopolimerlere çevrilmesine imkân tanımaktadır. Bu yaklaşım hem atıkların yeniden değerlendirilmesini sağlamakta hem de krom, formaldehit ve fenol gibi toksik

bileşenlerin kullanımını ortadan kaldırarak daha çevreci ve sürdürülebilir bir tabaklama süreci sunmaktadır (Beghetto ve arkadaşları, 2017).

3.3.1. Deri Tabaklamada Biyopolimer Kullanımının İnsan ve Çevre Sağlığı Açısından Avantajları

Biyopolimerler geleneksel tabaklamada bulunan krom, aldehit vb. gibi tehlikeli kimyasalları içermemesi açısından insan kullanımına sunulan derilerin daha sağlıklı olmasını sağlamaktadır. Tehlikeli kimyasallara deri yoluyla maruz kalma, başlıca kimyasal maddelerin doğrudan cilt ile teması, sıçrama sonucu deri yüzeyine ulaşması, kontamine olmuş yüzeylerle temas edilmesi veya kirlenmiş ekipman ve materyaller aracılığıyla gerçekleşen dolaylı temaslar şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Bu maruziyet yolları, kimyasalın deri tarafından emilmesine ve dolayısıyla insan sağlığı üzerinde çeşitli olumsuz etkilere neden olabilmektedir (Ballús ve arkadaşları, 2022; Çavdar, 2014). Krom tuzları söz konusu olduğunda, yüksek konsantrasyonlarda sodyum klorür varlığında, sıklıkla kullanılan formik asit ve sülfürik asit gibi güçlü asitlerden oluşan bir karışımla işlenerek derileri tabaklamaya hazırlamak için bir dekapaj aşaması (asitleştirme) gerekir. (Acar ve Yuksekdağ, 2023, Çetinkaya ve Çetinkaya, 2010). Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda hayvansal ve bitkisel kaynaklı biyopolimerlerin kullanımı insan sağlığını olumsuz yönde etkileyen zararlı kimyasalların bulunmasından daha sağlıklı olduğu söylenebilir (Acar ve Yuksekdağ, 2023; Beghetto ve arkadaşları, 2017; Aydoğdu ve arkadaşları, 2015).

Deri tabaklama işleminde kullanılan polimerler hayvansal ürünlerin işlenmesi ya da bitkilerden elde edilen atıkların kullanılmasıyla üretilen polimerler olduğundan çevresel açıdan büyük avantaj sağlamaktadır. Sürdürülebilir kalkınma kavramı gelecek nesilleri tehlikeye atmadan kaynakların rasyonel kullanımı, yaşam kalitesinin iyileştirilmesi ve ekosistemlerin korunmasını kapsayan mevcut bir toplum hedefini temsil etmektedir. Bu bağlamda, üretim süreçlerinde verimliliğin artırılması ve daha çevreci ve düşük etkili teknolojilerin uygulanması ile atığın en aza indirilmesi ve/veya atığı değerli ürünlere dönüştürmek için yeni metodolojiler, endüstriyel gelişme, çevre koruma ve sosyal refahı arttırmak için gerekli olan adımlardır. Atığın değerli ürünlere (örneğin malzemeler, kimyasallar ve enerji) dönüştürülmesi, gelecek nesiller için önemli bir sürdürülebilirlik potansiyeli

barındırmaktadır. Atık bertarafı ve/veya düzenli depolama için ilginç bir alternatif olmasının yanı sıra, katma değeri yüksek ürünlerin üretilmesiyle de değerini artıracaktır ve çevresel ve ekonomik açıdan büyük gelişim sağlayacaktır (Yavuz, 2010). Biyopolimerlerin kullanımı doğal kaynakların tükenmesine ya da atık üretimine katkı sağlamaz. Düşük karbon ayak izi sayesinde geleneksel petrokimya ürünlerine göre daha az enerji tüketilmesini sağlarken daha az karbon salınımının oluşmasına da imkân verir. Bu nedenle biyopolimerler kullanımı sera gazı emisyonlarını da düşürecektir. Biyolojik olarak parçalanabilen malzemelerdir ve dolayısıyla, biyopolimer tabaklama atıkları, çevreye zarar vermeden doğal olarak parçalanabilir. Tüm bu nedenler göz önüne alındığında biyopolimerlerin deri tabaklama için kullanımı çevresel açıdan önemli bir adım olup, sürdürülebilir bir geleceğin inşasında adımdır (Acar ve Yuksekdağ, 2023; Tozun ve Çınar, 2022; Bashimov, 2019).

3.3.2. Deri Tabaklamada Biyopolimer Kullanımının Ekonomik Açıdan Avantajları

Biyopolimerler genellikle yenilenebilir kaynaklardan elde edildiği için hammaddeleri daha ucuz olmaktadır. Biyopolimer tabaklama işlemi genellikle daha az enerji ve kimyasal kullanımı gerektirdiğinden üretim maliyetlerini de düşürmektedir. Biyopolimerler geleneksel polimerlere kıyasla daha düşük işleme sıcaklıklarında tabaklanabilmektedir. Bu durum enerji maliyetini azaltırken üretim süreçlerinin verimliliğini de artırabilmektedir. İnovasyon potansiyeli ile biyopolimerlerin kullanımı, geleneksel polimerlerin bazı fiziksel özelliklerini iyileştirebilmekte ve/veya farklı özellikler ekleyebilmektedir. Bu da deri tabaklama endüstrisinde yenilikçi ürünlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Yenilikçi ürünler rekabet avantajı ve pazarda farklılaşmayı sağlayabilmektedir (Hamamcı ve arkadaşları, 2018).

3.4. Deri Tabaklamada Biyopolimer Kullanımının Dezavantajları

Biyopolimerler her ne kadar geleneksel tabaklama yöntemlerine göre çevre ve insan sağlığı açısından zararı daha az olmasına rağmen, deri tabaklamada kullanıldıklarında bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir.

Su geçirmezlik: Biyopolimerler petrol bazlı polimerler kadar su geçirmez değildirler ve derinin suya dayanıklılığını azaltabilirler.

Dayanıklılık: Biyopolimerler petrol bazlı polimerler kadar dayanıklı değildir. Bu nedenle biyopolimerlerle tabaklanmış deri daha kısa bir ömrlü olabilir.

Fiyat: Biyopolimerlerin üretimi petrol bazlı polimerlerin üretiminden daha maliyetlidir. Bu nedenle biyopolimerlerle tabaklanmış derinin fiyatı daha yüksek olabilir.

Kaynak sınırlılığı: Biyopolimerlerin üretimi hammaddelerin sınırlı olması nedeniyle sınırlıdır. Bu nedenle biyopolimerlerin kullanımı geniş çapta uygulanamayabilir.

Kimyasal işleme gereksinimi: Biyopolimerler genellikle kimyasal işlemler gerektirirler. Bu işlemler derinin doğal özelliklerini değiştirebilir ve ürünün çevresel etkilerini azaltırken bazı kimyasal atıkların ortaya çıkmasına neden olabilir (Ballús ve arkadaşları, 2022; Aydoğdu ve arkadaşları, 2015).

3.4.1. Deri Tabaklamada Biyopolimer Kullanımının Çevresel Açından Dezavantajları

Biyopolimerlerin üretimi ve kullanımı çevre üzerinde kısmen de olsa olumsuz etkilere neden olabilir. Biyopolimerlerin üretimi için kullanılan hammaddelerin tarım faaliyetleri ile ilişkili olan etkileri de mevcuttur. Bunları aşağıdaki gibi sınıflayabiliriz (Akbulut ve Bulut, 2015):

Tarımsal üretimin artması: Biyopolimer üretimi için kullanılan hammaddelerin tarımsal üretimi arttıkça, tarım arazileri genişlemekte ve bu durum bazı doğal alanların kaybına neden olabilir.

Su kaynakları kullanımı: Biyopolimer üretimi için kullanılan bitkisel hammaddelerin üretimi, genellikle büyük miktarda su kullanımını gerektirir. Bu, su kaynaklarının tükenmesine ve yer altı su seviyelerinin azalmasına neden olabilir.

Toprak verimliliği: Biyopolimer üretimi için kullanılan bitkisel hammaddelerin üretimi, bazı durumlarda toprak verimliliğini azaltabilir. Özellikle sürekli bitki yetiştirme toprak yorgunluğuna ve toprak erozyonuna neden olabilir.

Tarım ilaçları kullanımı: Biyopolimer hammaddelerinin tarımsal üretimi bazı durumlarda tarım ilaçlarının kullanımını arttırabilir. Bu durum tarım

ilaçlarının çevresel etkilerini arttırabilir ve insan sağlığına zararlı kalıntıların oluşmasına neden olabilir.

Fiyat dalgalanmaları: Biyopolimer hammaddelerinin tarımsal üretimi fiyat dalgalanmalarına neden olabilir. Özellikle biyopolimer hammaddelerinin üretimi için kullanılan bitkisel ürünlerin fiyatları doğal afetler, iklim değişikliği veya diğer faktörler nedeniyle dalgalanabilir ve bu durum üreticiler için ekonomik açıdan zorlu olabilir.

Bahsi geçen bu nedenlerle biyopolimerlerin üretimi için kullanılan hammaddelerin tarımsal üretimi, sürdürülebilir tarım uygulamaları ve doğru yönetim stratejileri ile ele alınması oldukça önemlidir (Akbulut ve Bulut, 2015; Aydoğdu ve arkadaşları, 2015).

3.4.2. Deri Tabaklamada Biyopolimer Kullanımının İnsan ve Hayvan Sağlığı Açısından Dezavantajları

Son yıllarda biyopolimerlerin deri tabaklama işleminde kullanılması önerilmiştir. Ancak biyopolimerlerin kullanımının insan ve hayvan sağlığı açısından olası bazı dezavantajları da olabilir. Bunlar aşağıdaki şekilde açıklayabiliriz:

Alerjik reaksiyonlar: Biyopolimerlerin kullanımı bazı insanlarda alerjik reaksiyonlara neden olabilir. Bu reaksiyonlar cilt döküntüleri, kaşıntı, şişme ve solunum problemleri gibi semptomlarla kendini gösterebilir.

Toksisite: Biyopolimerlerin bazıları işlenmesi sırasında veya sonrasında toksik yan ürünler üretebilir. Bu yan ürünler insan ve hayvanlar için zararlı olabilir.

Biyolojik uyumsuzluk: Biyopolimerler her ne kadar toksik olmasa da, bazı insan ve hayvanlar için biyolojik uyumsuzluk sorunlarına neden olabilir. Bu vücudun yabancı bir madde olarak algıladığı ve reddettiği anlamına gelir (Beghetto ve arkadaşları, 2017; Yıldız ve Yangılar, 2014; İmamoğlu, 2011).

3.4.3. Deri Tabaklamada Biyopolimer Kullanımının Ekonomik Açıdan Dezavantajları

Biyopolimerlerin deride kullanımının birçok açıdan avantajı olmasının yanı sıra, maddi açıdan da dezavantajları bulunmaktadır. Bu ekonomik dezavantajları aşağıdaki gibi sınıflayabiliriz (Ballús ve arkadaşları, 2022).

İşlem süresi: Biyopolimerlerin kullanımı deri tabaklama işleminin süresini uzatabilir. Bu işlemin maliyetini artırabilir çünkü daha uzun süreli işlemler, daha fazla enerji, işçilik ve malzeme kullanımını gerektirir.

Ham madde maliyeti: Biyopolimerler doğal kaynaklar olduğundan, sentetik alternatiflerine göre daha maliyetli olabilirler. Bu nedenle biyopolimerlerin kullanımı işlemin maliyetini artırabilir.

Kalite kontrol: Biyopolimerlerin kullanımı kalite kontrolünü zorlaştırabilir. Biyopolimerler sıcaklık, pH ve diğer faktörlere karşı hassas olabilirler ve bu nedenle ürün kalitesinin kontrol edilmesi için daha fazla kaynak kullanımını gerektirebilirler.

Çevresel etki: Biyopolimerler doğal kaynaklar olduğundan çevresel etkileri göz önünde bulundurmak önemlidir. Biyopolimerlerin üretimi, işlenmesi ve atıklarının bertarafı, doğal kaynakların kullanımını ve çevresel etkilerini artırabilir.

Biyopolimer kullanımı deri tabaklama işleminin kalitesini artırabilir, ancak maliyet açısından bazı dezavantajları vardır. Bu nedenle biyopolimer kullanımının maliyeti ve kalite kontrolü gibi faktörleri göz önünde bulundurularak, biyopolimer kullanımının fayda ve dezavantajları dikkatlice değerlendirilip işletmede kullanımı sağlanmalıdır (Ballús ve arkadaşları, 2022; Tozun ve Çınar, 2022; Beghetto ve arkadaşları, 2017).

5. SONUÇ

Tekstil sektörü günümüzde birçok sanayi alanını besleyen önemli bir sektördür. Tekstil ürünlerini üretmek ve tükretmek için genellikle farklı türde iplikler kullanılır. İpliklerin üretimi öncelikle doğal veya sentetik hammaddelerin kullanımını gerektirir. Tekstil sektöründe kullanılan iplikler birçok farklı malzemeden üretilir. Doğal iplikler pamuk, yün, keten gibi bitkisel veya hayvansal kaynaklı olabilir. Sentetik iplikler ise petrol türevleri olan polimerlerden üretilmektedir. Biyopolimerler son yıllarda tekstil endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. Biyopolimerler doğal kaynaklardan elde edilen ve biyolojik olarak parçalanabilen polimerler olup, sentetik polimerlere kıyasla çevre dostu ve sürdürülebilirdir. Birçok farklı biyopolimer tekstil ve iplik üretiminde kullanılmakta olup, yenilikçi birçok biyopolimer de kullanılabilecek kapasiteye sahiptir. Biyopolimerlerin aktif şekilde tekstil sanayisinde kullanılması ve yenilenebilir kumaşların

üretilmesiyle doğada tekstil kaynaklı biyolojik birikim ve kirliliğin azalması sağlanabilir. Biyouyumlu iplikler aynı zamanda insan sağlığını tehdit eden petrol kaynaklı tekstil ürünlerine nazaran çevresel avantajlar da sağlamaktadır. Doğal kaynakların kullanımı ve özellikle biyoatıkların işlenebilir hale gelmesiyle maddi olarak da önemli bir avantaj sağlanmış olacaktır.

Türkiye sanayisi ve ihracatı açısından önemli bir sektör olan deri sektöründe tabaklama işlemi, derinin özelliklerini iyileştirmek ve dayanıklılığını artırmak için kullanılan bir işlemdir. Bu işlem geleneksel olarak kimyasal maddeler kullanılarak yapılırken, son yıllarda biyopolimerler gibi çevre dostu malzemelerin kullanımı da artmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar ve elde edilen veriler ışığında, çevresel etkilerinin azaltılması açısından özellikle deri tabaklama ve tekstil alanında kullanılan sentetik kimyasalların yerine, toksik değeri daha düşük olan biyopolimer malzemelerin kullanılması çevre, insan sağlığı ve maddi açıdan son derece önemlidir. Her ne kadar bazı üretim sorunları ve maliyet gibi dezavantajlar olsa da, avantajlı yönleri bu durumun önüne geçecek niteliktedir. Bu çalışmada mevcut sorunlar dahilinde tekstil ve deri sanayisinde kullanılan biyopolimer hakkında bilgi verilmiş olup, literatür ışığında bu biyopolimerlerin sektörde kullanımının avantaj ve dezavantajları hakkında ayrıntılı olarak bilgi verilmiştir.

Tekstil ve deri sanayisi dünyanın en büyük sanayilerinden olup sanayinin bu dallarında yenilikçi birçok çalışma yapılmaktadır. Son yıllarda yeni ihtiyaçların ortaya çıkması ve insanoğlunun çevresel farkındalığının artması sürdürülebilir ürünlere olan ilgiyi arttırmıştır. Gelişen yeni teknolojik ürünler ve yapılan çalışmalar biyopolimerlerin gelecekte daha yoğun olarak kullanılacağını göstermektedir. Biyopolimerlerin daha aktif kullanılması tekstil ve deri sanayisinde maliyet, sürdürülebilirlik, insan ve çevre sağlığı açısından önemli kazanımlar sağlayacaktır. Şimdilik üretim ve işleme konusunda her ne kadar dezavantajları olsa da teknolojinin ilerlemesi ve sürdürülebilir ürünlere ihtiyaç arttıkça, avantajları bunun önüne geçebilir. Biyopolimerler kullanımının diğer sektörlerde yaygınlaşmasıyla tekstil ve deri sanayisinde kullanımını da artacaktır. Biyolojik tabanlı ürünlerin tüketimi çevre ve insan sağlığı açısından avantaj sağlamasının yanı sıra, bilinçli toplumlarda kullanımın artmasına da olanak sağlayacaktır. Yenilikçi ürünlerin kullanılmaya başlamasındaki diğer bir önemli etken de, sürdürülebilir ekonomik ürün olmalarıdır. Gelişmiş sanayinin bir ürünü etkin bir şekilde son kullanıcıya sunmasındaki büyük etken, maddi

açından sürdürülebilir olmasıdır. Bu bağlamda, tekstil ve deri sektöründe biyopolimer kullanımı hızla artacak, gelecekte maddi kazanç sağlayan ve ekonomik avantaj oluşturan biyopolimerik ürünler kullanılacaktır.

KAYNAKÇA

- Acar, B. Ç. & Yuksekdağ, Z. (2023). Deri Endüstrisinde Krom Kullanımı ve Biyolojik Yöntemlerle Krom Giderimi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 1006-1029.
- Akbulut, Y. & Bulut, M. O. (2015). Tekstilde kullanılan bazı biyopolimerlerin tarıma uygulanabilirliği. *Yekarum*, 3(1), 35-44.
- Akçacı, T., Kartal, M. & Çınaroğlu, M. S. (2021). Küresel pazarlarda Türkiye deri sanayisinin rolü ve lojistik sektörü ilişkisi. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, 12(1), 94-109.
- Akdoğan, M. (2021). Polihidroksialkanoatların Genetiği Değiştirilmiş Bakterilerde Üretimi, Karakterizasyonu ve Matematiksel Modellenmesi, Kimya Mühendisliği Doktora Tezi,
- Ali, S. W., Rajendran, S. & Joshi, M. (2014). Chitosan and Its Derivatives for Antimicrobial Textile Applications. *Int. J. Biol. Macromol.*, 65, 295–304.
- Ali, S. W., Rajendran, S. & Joshi, M. (2014). Synthesis and Characterization of Chitosan and Silver Loaded Chitosan Nanoparticles for Bioactive Polyester. *Carbohydr. Polym.*, 83, 438–446.
- Alkaya, E. & Demirer, G. N. (2014). Sustainable textile production: A case study from a woven fabric manufacturing mill in Turkey, *Journal of Cleaner Production*, 65(4), 595-603.
- Aydın, N. (2021). Sürdürülebilir Giyilebilir Ürünler: İnsan Yaşam Kalitesini Artırmak İçin Giyilebilir Teknoloji. *Balkan & Near Eastern Journal of Social Sciences (BNEJSS)*, 7.
- Aydoğdu, M., Mancı, A. & Aydoğdu, M. (2015). Tarımsal Su Yönetiminde Değişimler; Sulama Birlikleri, Fiyatlandırma ve Özelleştirme Süreci, *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 14(52), 146-160.
- Ballús, O., Guix, M., Micó, R. & Bacardit, A. (2022) Production of a biopolymer for leather. A life cycle assessment perspective, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2130844/v1>]
- Baran, M. F., Bellitürk, K. & Çelik, A. (2021). Türkiye’de Sürdürülebilir Tarım Uygulamaları: Zorluklar ve Potansiyeller. Ankara, İksad Publishing House.

- Bashimov, G. (2019). Türk Deri Sanayiinin Karşılaştırmalı Üstünlüğü: Seçilmiş Asya Ülkeleri ile Bir Karşılaştırma. *İktisadi Yenilik Dergisi*, 6(2), 30-43.
- Bashimov, G. (2017). Türk tekstil ve hazır giyim sektörünün uluslararası rekabet gücü: ASEAN-5 ülkeleri ile karşılaştırmalı analiz. *Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 4(2), 1-15.
- Beghetto, V., Ugolini, F., Tortora, A., Taddei, L., Scrivanti, A. & Sole, R. (2017). Green Biopolymers for Ecofriendly Leather, *Journal of Materials Science and Engineering A* 7 (7-8) 199-205.
- Berber, G. Ş. & Keskin, E. (2021). Sürdürülebilir Modada Güncel Bir Yaklaşım: Vegan Deri A Current Approach in Sustainable Fashion: Vegan Leather. *Uluslararası Kültürel ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 7(2), 143-157.
- Buharalı, G. & Ömeroğlu, S. (2013). Open-end rotor iplik özelliklerine etki eden faktörler. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 18(2), 19-35.
- Can, Ö. & Ayvaz, K. M., (2017). Tekstil ve Modada Sürdürülebilirlik, *Akademia Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(1), 110-119.
- Catalina, M., Cot, J., Balu, A. M., Serrano-Ruiz, J. C. & Luque, R. (2012). Tailor-Made Biopolymers from Leather Waste Valorisation. *Green Chemistry*, 14 (2), 308–316.
- Coltelli, M. B., Danti, S., De Clerck, K., Lazzeri, A. & Morganti, P. (2020). Pullulan for Advanced Sustainable Body- and Skin-Contact Applications. *J. Funct. Biomater.*, 11, 20.
- Crini, G. & Badot, P. M. (2008). Application of Chitosan, a Natural Aminopolysaccharide, for Dye Removal from Aqueous Solutions. *Prog. Polym. Sci.*, 33, 399–447.
- Çankaya, N. & Sökmen, Ö. (2016). Kitosan-Kil Biyonanokompozitleri, *Politeknik Dergisi*, 19(3), 283-295.
- Çavdar, B. (2014). Tabaklama İşlemlerinde Kimyasalların Deri Yolu İle Maruziyetinde Riskler ve Önlemler. *İş Sağlığı Ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı*, Ankara.
- Çelen, O. & Koçer, H. B., (2022). Kesit Şeklinin Poli (L-Laktik Asit) Filament İplik Özelliklerine Etkisi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(1), 375-388.

- Çetinkaya, F. & Çetinkaya, Y. (2010). Derinin Tabaklanması İşleminde Maskaletme Maddeleri Kullanımının Krom Alımı Üzerine Etkisinin Araştırılması, *Hayvansal Üretim*, 51(1), 40-47.
- Çoban, O. (2015). Yenilenebilir enerji tüketimi karbon ve emisyonu ilişkisi: TR örneği. *Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 1(38), 195-208.
- Dağbaşı, S. & Göksungur, Y. (2005). Mikrobiyal Yolla Üretilen Polisakkaritler ve Gıda Sanayinde Kullanımı. *Akademik Gıda*, 3(2), 32-37.
- Demir, A., Öktem, T. & Seventekin, N. (2008). Kitosanın Tekstil Sanayiinde Antimikrobiyal Madde Olarak Kullanımının Araştırılması, *Journal of Textile & Apparel/Tekstil ve Konfeksiyon*, 18(2).
- Dilek, Y. (2017) Wet-White Deri Ürün Özelliklerinin Geliştirilmesi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*.
- Doldur, H. & Kartal, M. (2022). Türkiye’de Deri Sanayisinin Mekânsal Dağılışı. *Ege Coğrafya Dergisi*, 31(1), 55-68.
- Dursun, S., Erkan, N., & Yesiltas, M. (2010). Dogal biyopolimer bazli (biyobozunur) nanokompozit filmler ve su ürünlerindeki uygulamalari. *Journal of FisheriesSciences.com*, 4(1), 50-77.
- El-Tahlawy, K. F., El-Bendary, M. A., Elhendawy, A. G. & Hudson, S. M. (2005). The Antimicrobial Activity of Cotton Fabrics Treated with Different Crosslinking Agents and Chitosan. *Carbohydr. Polym.*, 60 (4), 421–430.
- Elamri, A., Zdiri, K., Hamdaoui, M. & Harzallah, O. (2023). Chitosan: A biopolymer for textile processes and products, *Textile Research Journal*, 93(5–6), 1456–1484.
- Erdoğan, S. (2020). Enerji, çevre ve sera gazları. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 10(1), 277-303.
- Ergin, Ç. (2020). Biyobozunur Lif İçeren Dış Giyimlik Dokuma Kumaş Özelliklerinin İncelenmesi, *Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi*,
- Ersoy, Y. & Şenol, M. F. (2017). Ham Madde Cinsi ve Üretim Parametrelerinin İplik Kalitesine Etkisi: Open-End İplikçiliği Üzerine Bir Uygulama, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 8(1), 96-107.

- Eser, B., Çelik, P., Çay, A. & Akgümüş, D. (2016). Tekstil ve Konfeksiyon Sektöründe Sürdürülebilirlik ve Geri Dönüşüm Olanakları, *Journal of Textiles and Engineer*, 23(101), 43-60.
- Esi, B. (2017). Türk Tekstil Endüstrisi ve Gelişimi. *Journal of Awareness*, 2(Special), 643-663.
- Garrison, T. F., Murawski, A. & Quirino, R. L. (2016). Bio-Based Polymers with Potential for Biodegradability. *Polymers*, 8(7), 262.
- Hamamcı, M., Çiftçi, B., Aktaş, T. (2018). Yeşil Kompozitlerde Biyopolimerlerin Kullanımının Önemi, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi* 8(1), 12-24.
- Islam, S., Shahrizzaman, M., Biswas, S., Rahman, M. M. & Zakaria, M. P. (2019). Chitosan Based Bioactive Materials in Tissue Engineering Applications—A Review. *Bioact. Mater.*, 5, 164–183.
- Işıtan, A., Gök, C., Sulak, M., Kırmızı, F., Onar, V. & Kutlubay, R. Ç. (2022). Bioplastics / Biopolymers: How aware are we?, *European Journal of Science and Technology*, 37, 36-41.
- İmamoğlu, Ö. (2011). Biyokontrolde doğal ürünlerin kullanılması, *Kitosan. Türk Hijyen ve Deneysel Biyoloji Dergisi*, 68(4), 215-222.
- İstanbul Sanayi Odası, (2015). Deri ve Deri Ürünleri İmalat Sanayi, İstanbul. https://www.iso.org.tr/file/ISO_Deri_ve_Deri_Urunleri_Imalati_Sanayi_Sektor_Raporuv2_2015-3982.pdf
- Jahandideh, A., Ashkani, M. & Moini, N. (2021). Biopolymers İn Textile Industries, In book: *Biopolymers and their Industrial Applications* Chapter 8.
- Kalaycı, E. & Çağlar, E. (2021). Tekstilde Boyama Atık Suyundan Isı Geri Kazanımı: Gerçek İşletme Örneği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(2), 609-628.
- Kanagaraj, J., Velappan, K. C., Babu, N. K. C. & Sadulla, S. (2006). Solid Wastes Generation in the Leather Industry and Its Utilization for Cleaner Environment—A Review. *J. Sci. Ind. Res.*, 65, 541–548.
- Karakuş, E., Balbalı, E. K., Ara, İ. & Ayhan, Z. (2021). Polisakkarit ve Protein Bazlı Aktif Biyokompozit Malzemelerin Gıda Ambalajlama Açısından Değerlendirilmesi, *Akademik Gıda* 19(1), 74-88.

- Karaoğlu, M. M. & Kotancılar, H. G. (1998). Modifiye Nişasta Eldesi ve Fırın Ürünlerinde Kullanımı, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 29(2), 359-368.
- Khalil, H. A., Bhat, A. H. & Yusra, A. I. (2012). Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. Carbohydrate polymers, 87(2), 963-979.
- Kılınç, M., Tomar, O., & Çağlar, A. (2017). Biyobozunur gıda ambalaj malzemeleri. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17(3), 988-996.
- Klemm, D., Heublein, B., Fink, H. P. & Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material. Angew. Chem. Int. Ed., 44, 3358–3393.
- Köksal, Ö., Er, B. A., Ardalı, Y. & Sağlam, M. (2019). Biyoplastiklerin biyodegradasyonu. Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(2), 151-167.
- Lim, S. H. & Hudson, S. M. (2004). Application of a Fiber-Reactive Chitosan Derivative to Cotton Fabric as an Antimicrobial Textile Finish. Carbohydr. Polym., 56(2), 227–234.
- Megep, (2011). [https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Tabaklam a.pdf](https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Tabaklam_a.pdf)
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J. & Youngblood, J. (2011). Cellulose Nanomaterials Review: Structure, Properties and Nanocomposites. Chem. Soc. Rev., 40, 3941–3994.
- Muthu, S. S. (Ed.). (2014). Roadmap to sustainable textiles and clothing: Eco-friendly raw materials, technologies, and processing methods. Springer. Singapore.
- Niaounakis, M. (2015). Biopolymers: Processing and Products, William Andrew Publishing: Oxford, UK.
- Ölçer, H. & Akın, B. (2008). Nişasta: biyosentezi, granül yapısı ve genetik modifikasyonlar. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 16, 1302-3055.
- Roy, D., Semsarilar, M., Guthrie, J. T. & Perrier, S. (2009). Cellulose Modification by Polymer Grafting: A Review. Chem. Soc. Rev., 38, 2046–2064.

- Shen, L., Worrell, E. & Patel, M. (2010). Present and future development in plastics from biomass. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining: Innovation for a sustainable economy*, 4(1), 25-40.
- Stoica, M., Antohi, V. M., Zlati, M. L. & Stoica, D. (2020). The financial impact of replacing plastic packaging by biodegradable biopolymers - A smart solution for the food industry, *Journal of Cleaner Production* Volume 277, 124013.
- Thakur, V. K., Thakur, M. K., Raghavan, P. & Kessler, M. R. (2018). Progress in Green Polymer Composites from Lignin for Multifunctional Applications: A Review. *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 6(2), 162–176.
- Thomas, B., Raj, M. C., Athira, K. B., Rubiyah, M. H., Joy, J., Moores, A., Drisko, G. L. & Sanchez, C. (2018). Nanocellulose, a Versatile Green Platform: From Biosources to Materials and Their Applications. *Chem. Rev.*, 118, 11575–11625.
- Tozun, H. & Çınar, N., (2022). Kültürel Miras Bağlamında Derilerin Fiziksel Özellikleri ve Ham Derinin İşlenmesi, *Sanat Tarihi Dergisi*, 29(2), 371-397.
- Türemen, M. & Demir, A. (2017). Analysis of biopolymer application on cotton fabrics by different methods. *Textile and Apparel*, 27(4), 366-372.
- Tüylek, Z. (2020). Sağlık Alanında Kullanılan Polimerik Biyomateryaller. *Tıp Fakültesi Klinikleri Dergisi*, 3(2), 67-76. 65-74.
- Uğur, A. (2004). Türkiye'nin Dış Ticaretinde Tekstil Giyim Sektörünün Yeri ve Yeni Rekabet Dönemi, *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 2(2), 26-49.
- Uner, İ. & Kocak, E. D. (2012). Poli(Laktik Asit)'in Kullanım Alanları ve Nano Lif Üretimdeki Uygulamaları, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 22, 79-88.
- Uyanık, S. & Çelikel, D. C. (2019). Türk tekstil endüstrisi genel durumu. *Teknik Bilimler Dergisi*, 9(1), 32-41.
- Üçgül, İ., Aras, S. & Küçükçapraz, D. Ö. (2016). Farklı Hammadde Kaynaklarından Kitinin Saflaştırılması ve Tekstil Uygulamaları. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 9(1), 46-56.
- Vakili, M., Rafatullah, M., Salamatina, B., Abdullah, A. Z., Ibrahim, M. H., Tan, K. B., Gholami, Z. & Amouzgar, P. (2014). Application of Chitosan and Its Derivatives as Adsorbents for Dye Removal from Water and Wastewater: A Review. *Carbohydr. Polym.*, 113, 115–130.

- Yavuz, V. A. (2010). Sürdürülebilirlik Kavramı ve İşletmeler Açısından Sürdürülebilir Üretim Stratejileri, Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 7(14), 63-86.
- Yıldız, P. O. & Yangılar, F. (2014). Gıda endüstrisinde kitosanın kullanımı. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 30(3), 198-206.
- Yoruç, A. B. H. & Uğraşkan, V. (2017). Yeşil Polimerler ve Uygulamaları, Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering 17, 017102, 318-337.
- Younes, B. (2016). Characterization, Modeling and the Production Processes of Biopolymers in the Textiles Industry, Biocomposites, The Journal of The Textile Institute 108(5), 1-9.

BÖLÜM 4

EKOLOJİK AÇIDAN KÖMÜR MADENCİLİĞİ: ZONGULDAK HAVZASI VAKA İNCELEMESİ

Dr. Öğr. Üyesi Niyazi Erdem DELİKANLI¹
Esra GÜZEL KARABULUT²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.21208650>

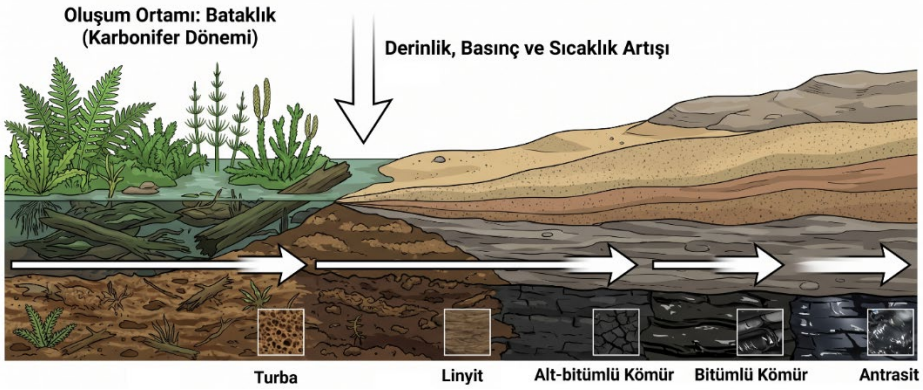
¹ Bartın Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi , Çevre Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye. edelikanli@bartin.edu.tr, orcid id: 0000-0002-1322-3989

² Bartın Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Fakültesi , Çevre Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye. esraguzel@outlook.com, orcid id: 0009-0002-2849-6346

1. GİRİŞ

Kömür, modern endüstriyel uygarlığın temel enerji omurgasını oluşturan, jeolojik zaman ölçeklerinde biyosfer ile litosfer arasındaki karbon döngüsünün en somut tezahürü olan karmaşık bir tortul kayadır. Basit bir yanıcı madde tanımının ötesinde kömür; paleoklimatik koşulların, tektonik hareketlerin ve biyokimyasal bozunma süreçlerinin milyonlarca yıl süren etkileşiminin litolojik bir kaydı olarak kabul edilmektedir (Schweinfurth, 2009). Kimyasal açıdan kömür, büyük ölçüde karbon, hidrojen ve oksijenden oluşan, bunun yanında kükürt ve azot gibi heteroatomları ve çok sayıda eser elementi bünyesinde barındıran heterojen bir makromoleküler yapıdır (Fitzer vd., 1995). Bu yapı, oluşum sürecindeki bitkisel materyalin türüne ve maruz kaldığı jeolojik basınç ile sıcaklığın şiddetine bağlı olarak linyitten antrasite kadar geniş bir spektrumda çeşitlilik göstermektedir (Schweinfurth, 2009).

Kömürün oluşumu, "kömürleşme" (coalification) olarak adlandırılan ve organik maddenin fizikokimyasal özelliklerinin termodinamik yasalar çerçevesinde geri dönülemez şekilde değiştiği bir metamorfizma sürecidir (Şekil 1). Dünya üzerindeki en devasa kömür yataklarının oluştuğu Karbonifer ve Permian dönemleri, yeryüzünün biyolojik ve atmosferik tarihinde kritik bir eşiği temsil eder. Bu dönemde, atmosferdeki karbondioksit (CO_2) konsantrasyonunun bitkisel fotosentez yoluyla dramatik şekilde düşmesi ve bu karbonun litosfere hapsedilmesi, küresel iklimin soğumasına ve geniş çaplı buzullaşma süreçlerine yol açmıştır (Feulner, 2017). Literatürdeki yaygın bir tartışma, bu dönemdeki devasa kömür birikiminin nedenini, odunsu bitkilerdeki lignin bileşenini parçalayabilen mantarların (Agaricomycetes) evrimindeki bir gecikmeye bağlamaktadır; ancak modern filogenetik ve jeokimyasal analizler, bu "evrimsel gecikme" hipotezini reddederek, kömür birikiminin temel nedeninin o dönemdeki tektonik ve iklimsel koşullar olduğunu ortaya koymaktadır (Nelsen vd., 2016).



Şekil 1. Kömürleşme Süreci Şeması

Küresel enerji projeksiyonları incelendiğinde, kömürün "paradoksal" bir konumda olduğu görülmektedir. Bir yandan Paris Anlaşması ve "Net Sıfır 2050" hedefleri kapsamında kömür kullanımının hızla terk edilmesi gerektiği vurgulanırken, diğer yandan küresel kömür tüketimi tarihsel zirvelerine yakın seyretmeye devam etmektedir (IEA, 2023). Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre kömür, dünya elektrik üretiminin yaklaşık %35'ini sağlamakta ve özellikle gelişmekte olan ekonomilerde demir-çelik ve çimento gibi ağır sanayi kollarının vazgeçilmez girdisi olma özelliğini korumaktadır (IEA, 2024; IEA, 2025). Ancak bu ekonomik bağımlılık, devasa bir çevresel maliyeti de beraberinde getirmektedir. Kömür, enerji kaynaklı küresel CO₂ emisyonlarının %40'ından fazlasından sorumlu olan en karbon-yoğun yakıttır (IEA, 2022). Kömür sınıflarının alt rütbelerinden antrasite kadar olan bu derecelendirme; karbon içeriği, nem oranı ve endüstriyel kullanım potansiyeli açısından Tablo 1'de özetlenmiştir.

Kömürün bu ikili doğası —bir yanda enerji güvenliğinin garantörü, diğer yanda iklim krizinin öncüllerinden olması— madencilik faaliyetlerinin çevresel yönetimini bir mühendislik zorunluluğunun ötesine taşıyarak bir etik meselesi haline getirmiştir. Madencilik süreci; arazi kullanım değişikliklerinden su kaynaklarının asitlenmesine, hava kalitesinin bozulmasından tasman gibi jeomekanik risklere kadar geniş bir yelpazede ekosistem hizmetlerini tehdit etmektedir (Sohail, 2025; Emekwisia vd., 2025). Bu nedenle, kömürün doğasını anlamak, sadece onun yanma ısını bilmek değil, aynı zamanda milyonlarca

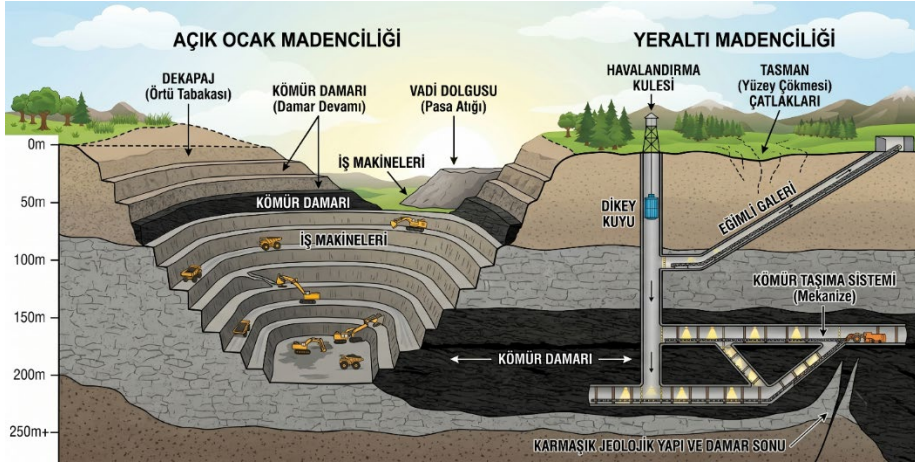
yıllık jeolojik emeğin ve son iki yüzyıllık endüstriyel gelişimin bilançosunu doğru okumayı gerektirmektedir.

Tablo 1. Kömür Sınıflarının Fizikokimyasal Özellikleri ve Kullanım Alanları (Schweinfurth, 2009; UN-ECE, 1998'den uyarlanmıştır).

Kömür Sınıfı	Alt Sınıflar	Karbon İçeriği (Yaklaşık)	Özellikler ve Kullanım Alanları
Linyit	Linyit A, Linyit B	%25 - %35	En genç ve en düşük rütbeli kömürdür. Nem oranı (%30-70) çok yüksektir. Enerji yoğunluğu düşük olduğu için genellikle çıkarıldığı maden sahasının yakınındaki termik santrallerde yakılır.
Alt-Bitümlü	A, B, C Grupları	%35 - %45	Linyitten daha sert, bitümlü kömürden daha yumuşaktır. Genellikle 100 milyon yıllık formasyonlarda bulunur. Elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılır.
Bitümlü	Düşük, Orta, Yüksek Uçucu	%45 - %86	Endüstride en yaygın kullanılan türdür. Elektrik üretiminin yanı sıra, koklaşabilir özellikte olanları demir-çelik sanayisinde redüktan olarak kullanılır. Yüksek ısı değere sahiptir.
Antrasit	Yarı, Meta-Antrasit	%86 - %97+	"Sert kömür" olarak bilinir. En yüksek metamorfizma derecesine sahiptir. Uçucu madde oranı çok düşüktür (%2-8), bu nedenle dumansız, kısa ve mavi bir alevle yanar. Enerji yoğunluğu en yüksek türdür ancak rezervleri kısıtlıdır.

2. KÖMÜR MADENCİLİĞİ YÖNTEMLERİ VE ÇEVRESEL ETKİ DİNAMİKLERİ

Kömürün ekstraksiyonu, jeolojik rezervin derinliği, damar geometrisi ve üzerindeki örtü tabakasının (dekapaj) kalınlığına bağlı olarak iki temel mühendislik yaklaşımıyla gerçekleştirilir: yüzey (açık ocak) madenciliği ve yeraltı madenciliği. Her iki yöntem de sadece birer üretim süreci değil, aynı zamanda ekosistemin fiziksel ve kimyasal yapısını kökten değiştiren "antropojenik jeolojik olaylar" olarak tanımlanmaktadır (Sohail, 2025; Hartman vd., 2002). Açık ve yeraltı madenciliği yöntemlerinin yapısal ve operasyonel farklılıkları karşılaştırmalı olarak Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Açık ve Yeraltı Madencilik Karşılaştırma Kesiti

2.1. Açık Ocak Madenciliği: Topoğrafik ve Ekolojik Yıkım

Açık ocak madenciliği, kömür damarlarının yüzeye yakın olduğu durumlarda dekapaj tabakasının tamamen kaldırılmasına dayanan, operasyonel açıdan yüksek verimli ancak ekolojik açıdan olumsuz yöntemdir. Bu süreçte ilk müdahale, arazideki bitki örtüsünün tamamen temizlenmesi ve ardından binlerce yıllık süreçte oluşmuş verimli üst toprağın kazınmasıdır. Ghose (2004), açık ocak madenciliğinin toprak verimliliği üzerindeki etkilerini incelediği çalışmasında, toprağın fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerinin depolama ve kazı sırasında ani ve şiddetli bir bozulmaya uğradığını vurgulamaktadır. Toprağın katmanlar halinde ayrılarak depolanması, toprak içindeki aerobik ve anaerobik dengeyi bozmakta, bu da toprağın biyolojik olarak "steril" hale gelmesine ve ekosistem hizmetlerini yerine getiremez duruma gelmesine neden olmaktadır (Ghose, 2004; Więckol-Ryk vd., 2023).

Topoğrafik açıdan açık madencilik, "dağ zirvesi kaldırma" uç örneklerde görüldüğü üzere, havza hidrolojisini kalıcı olarak değiştirmektedir. Zirvelerden kazılan milyonlarca ton kaya ve toprak atığı, genellikle vadi dolgusu olarak vadi tabanlarına boşaltılmakta; bu durum sadece yerel topoğrafyayı değiştirmekle kalmayıp, akarsu ağlarını gömmekte ve suyun kimyasal kompozisyonunu değiştirmektedir (Ross vd., 2016). Ross vd. (2016), bu tür müdahalelerin havza bazındaki etkisinin, sadece yüzey alanı kaybıyla değil,

yeraltı suyu akış yollarının ve kayaç porozitesinin kalıcı olarak değişmesiyle ölçülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.2. Yeraltı Madenciliği: Jeomekanik Riskler ve Hidrolojik Değişimler

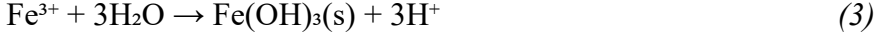
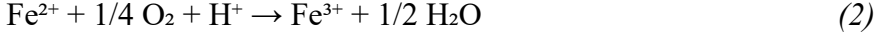
Kömür damarının derinlerde olduğu durumlarda tercih edilen yeraltı madenciliği, yüzey topoğrafyasına etki etmiyor gibi görünse de, yerkabuğunun iç dinamiklerinde ve yeraltı su rejimlerinde ciddi bozulmalara yol açar (Emekwisia vd., 2025). Bu yöntemde en kritik çevresel ve mühendislik sorunu "tasman" olayıdır. Üretimi tamamlanan ve destek sistemleri (tahkimat) geri alınan galerilerin tavanının kontrollü veya kontrolsüz olarak çökmesi, yüzeyde dalgalı bir topoğrafya veya ani çökmeler yaratmaktadır. Altun vd. (2010), tasmanın sadece kentsel altyapı ve binalarda çatlaklara yol açan fiziksel bir risk değil, aynı zamanda yerüstü sularının yeraltı galerilerine sızmasına imkan tanıyan ve akifer yapısını bozan bir hidrojeolojik tehdit olduğunu belirtmektedir.

Yeraltı madenciliğinin bir diğer önemli etkisi "maden suyu drenajı" yönetimidir. Üretim faaliyetlerini sürdürebilmek için yeraltı su seviyesinin sürekli olarak pompa sistemleriyle düşürülmesi gerekmektedir. Bu sürekli pompalama işlemi, bölgesel su tablosunun düşmesine, çevre köylerdeki içme suyu kuyularının kurumasına ve sulak alanların hidrolojik dengesinin bozulmasına neden olmaktadır (Hobbs vd., 2008). Ayrıca, maden galerilerinden çekilen bu suların kimyasal kompozisyonu, maden içindeki pirit gibi sülfürlü minerallerle girdiği reaksiyonlar sonucunda kirlilik yükü taşıyabilmektedir.

2.3. Asidik Maden Drenajı (AMD): Kimyasal Süreçler ve Su Kaynaklı Tehditler

Kömür madenciliğinin hidrosfer üzerinde bıraktığı en kalıcı ve yıkıcı etki, şüphesiz Asidik Maden Drenajı (AMD) oluşumudur. AMD, kömür damarlarında ve bu damarları çevreleyen yan kayaçlarda yaygın olarak bulunan sülfürlü minerallerin (başta pirit, FeS_2 , ve markazit olmak üzere), madencilik faaliyetleri sonucunda yeraltı su tablasının düşürülmesiyle havada bulunan serbest oksijen ve su ile reaksiyona girmesi sonucu meydana gelir (Younger,

2001). Piritin oksidasyonu sonucunda oluşan H^+ ve SO_4^{2-} iyonları, sulu ortamda sülfürik asit karakteri oluşturarak pH'ın önemli ölçüde düşmesine neden olur:



Bu reaksiyonlar, *Acidithiobacillus ferrooxidans* gibi asidofilik ve kemolitotrofik bakterilerin katalizör etkisiyle doğal oksidasyon hızından binlerce kat daha hızlı gerçekleşebilir (Rambabu vd., 2020).

Suyun pH seviyesinin 2.0 ile 4.0 aralığına kadar düşmesi, maden sahasındaki suları oldukça agresif bir kimyasal çözücü haline getirir. Asidik sular, maden pasalarından, kömür atıklarından ve çevre kayalarından alüminyum (Al), mangan (Mn), çinko (Zn), bakır (Cu), arsenik (As) ve kadmiyum (Cd) gibi toksik ağır metalleri ve eser elementleri çözerek mobilize eder (Schwartz vd., 2018; Ketris ve Yudovich, 2009). Bu durum, AMD'yi sadece bir asitlik problemi olmaktan çıkarıp, çok bileşenli bir kirlenici haline getirir. Ağır metallerle yüklü bu asidik sular, yüzey sularına karıştığında sucul ekosistemleri tamamen yok edebilir. Demir iyonlarının (Fe^{3+}) nötralle edilen sulara demir hidroksit ($Fe(OH)_3$) olarak çökmesiyle oluşan "sarı çocuk" (yellow boy) adı verilen turuncu-kırmızı renkli çamur tabakası (Şekil 3), akarsu tabanlarını kaplayarak bentik makroorganizmaların ve balıkların solungaçlarını tıkar, sucul habitatı fiziksel olarak boğar (Younger, 2001).

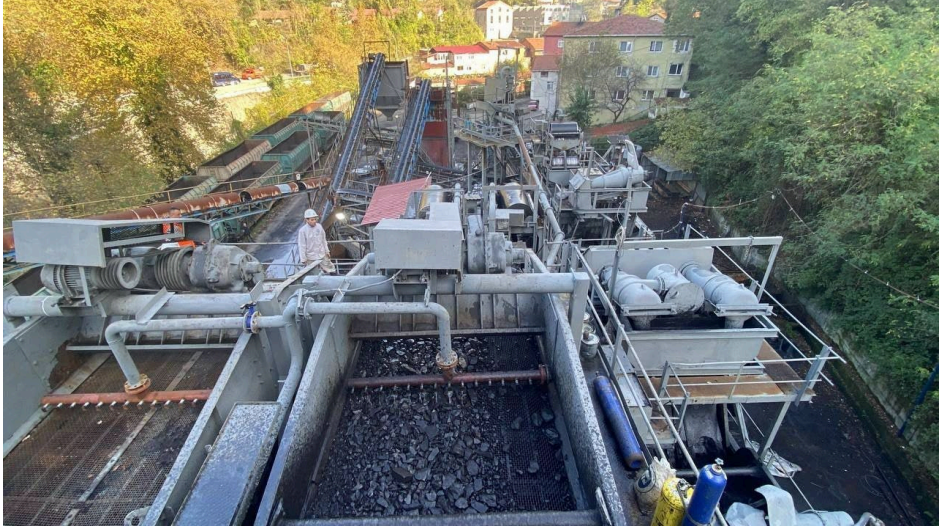


Şekil 3. Bakır pasasından çözünen demir sülfürlerin preipitasyonu ile oluşan $Fe(OH)_3$ çökelleri (yellow boy), (Atabey, 2010).

AMD'nin en endişe verici özelliklerinden biri de zamansal kalıcılığıdır. Madencilik faaliyetleri sona erip madenler terk edildikten sonra, yeraltı su pompalarının durdurulmasıyla su seviyesi yeniden yükselir. Oksitlenmiş pirit yüzeylerinin suyla yıkanması sonucu, AMD kirliliği on yıllar, hatta yüzyıllar boyunca havzayı zehirlemeye devam edebilir (Younger, 2001). AMD'nin kontrol altına alınması için aktif (kimyasal nötralizasyon) ve pasif arıtma sistemleri kullanılmaktadır. Pasif sistemler, özellikle Anoksik Kireçtaşı Drenleri (ALD) ve yapay sulak alanlar, asitliği düşürmek ve metalleri çöktürmek için yerel jeokimyasal ve biyolojik süreçleri kullanarak daha sürdürülebilir, düşük maliyetli uzun vadeli çözümler sunmaktadır (Faulkner ve Skousen, 1994; Zipper vd., 2006).

3. VAKA ANALİZİ: ZONGULDAK KÖMÜR HAVZASI VE TTK ÜZÜLMEZ İŞLETMESİ

Kömür madenciliğinin çevresel, jeolojik ve sosyo-ekonomik etkilerini küresel ölçekteki teorik tartışmalardan çıkarıp somutlaştırabilmek için, Türkiye'nin en büyük ve stratejik yer altı taşkömürü havzası olan Zonguldak Havzası detaylı bir ekstrapolasyon alanı sunmaktadır. Bu havza, Türkiye'nin sanayileşme tarihinin başladığı yer olmasının yanı sıra, yaklaşık 1,52 milyar tonluk jeolojik rezerviyle (antrasit ve bitümlü kömür) ağır sanayinin ve demir-çelik sektörünün ana besleyicisidir. Havza sınırları içerisinde faaliyet gösteren Türkiye Taşkömürü Kurumu (TTK) Üzülmüş İşletme Müessesesi, kömür madenciliği faaliyetlerinin kentsel yerleşimlerle mekânsal ve işlevsel etkileşimini ortaya koyması bakımından önemli bir araştırma alanı niteliğindedir. İşletme, madencilik kaynaklı çevresel baskıların yerel ekosistemler ve yerleşim alanları üzerindeki etkilerinin, bu baskıların çevresel sistem tarafından ne ölçüde tolere edilebildiğinin ve hangi koşullarda ekolojik bozulmaya dönüştüğünün değerlendirilmesine olanak sağlayan temsil gücü yüksek bir vaka çalışmasıdır. Şekil 4'te Türkiye Taşkömürü Kurumu'na (TTK) bağlı Zonguldak Üzülmüş Müessesesi'ndeki lavuar alanı gösterilmektedir.



Şekil 4. Türkiye Taşkömürü Kurumu'na (TTK) bağlı Zonguldak Üzülmüş Müessesesi'ndeki Lavuar Alanı (Elmas 67, 2023)

3.1. Havza Profili, Jeolojik Yapı ve İşletme Karakteristiği

Zonguldak havzası, Pontid tektonik birliğinin bir parçası olup, Karbonifer yaşlı kömür damarlarını barındırır. Havzanın jeolojik yapısı, Alpin Orojenezi'nin yoğun tektonik baskılarına maruz kalmış olması nedeniyle son derece kırıklı, faylı, eğimli ve karmaşıktır. Bu jeolojik zorluk, dünyadaki birçok havzada başarıyla uygulanan geniş ölçekli tam mekanize üretim sistemlerinin Zonguldak'ta kısıtlı alanlarda kullanılabilmesine, üretimin hala büyük oranda emek yoğun ve yarı mekanize sistemlere (havalı kazmalar, domuzdamı tahkimatları) dayanmasına neden olmaktadır.

TTK Üzülmüş İşletmesi, Zonguldak kentsel yerleşiminin altında, şehir merkezine yalnızca 7 kilometre mesafede, 28 kilometrekarelik dar ve topografik olarak engebeli bir ruhsat sahasında yer almaktadır. İşletmede üretim, deniz seviyesinin altındaki derinliklerde (-45 ile -280 kotları arası) gerçekleştirilmektedir. Kalınlıkları 2,00 ile 6,10 metre arasında değişen üç ana kömür damarı üzerinde yürütülen yeraltı üretim faaliyetleri, yüzey topoğrafyası ve kentsel yerleşim alanlarıyla doğrudan mekânsal ilişki içerisinde. Yeraltı üretim alanlarının yerleşim bölgelerine yakın konumlanması, madencilik faaliyetlerinden kaynaklanan tasman (zemin oturması), gürültü, atık yönetimi ve su kaynaklarının kirlenmesi gibi çevresel etkilerin kentsel çevreye doğrudan yansımaya neden olmaktadır. Bu durum, çevresel baskıların halk sağlığı,

altyapı bütünlüğü, arazi kullanımı ve kentsel güvenlik üzerinde önemli riskler oluşturmaya yol açmakta; dolayısıyla madencilik faaliyetlerinin çevresel etkilerinin bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

3.2. Hidrosferik Etkiler: Su Yönetimi, Lavuar Tesisleri ve Şlam Geri Kazanımı

Dünya genelindeki kömür madenlerinin en büyük problemi olan Asidik Maden Drenajı (AMD), Zonguldak havzasının spesifik jeokimyasal özellikleri sayesinde Üzülmaz İşletmesi'nde majör bir çevresel olumsuzluğa dönüşmemektedir. Bu durum, bir mühendislik çözümünden ziyade, tamamen jeolojik bir özelliktir. Üzülmaz sahasındaki kömür formasyonlarını çevreleyen litolojik birimlerin pirit içeriğinin düşük olması ve daha da önemlisi, ortamda bol miktarda bulunan karbonatlı kayaların (kireçtaşı, dolomit) doğal bir tamponlama kapasitesi yaratması, sülfür oksidasyonunu ve asit oluşumunu baskılamaktadır.

Ancak madenciliğin su kaynakları üzerindeki asıl baskısı, yeraltından çıkarılan tüvenan kömürün "lavuar" adı verilen yıkama ve zenginleştirme tesislerinde işlenmesi aşamasında ortaya çıkar. Kömür, içerdiği inorganik maddelerden (kül) ve taşlardan arındırılmak için yoğun miktarda su ile yıkanır. TTK Üzülmaz Lavuar tesislerinde çevresel etkiyi minimize etmek adına su yönetimi kapalı bir döngü sistemiyle kurgulanmıştır. Kömür yıkama işlemleri sırasında oluşan ve 0,5 mm'den daha ince tane boyutuna sahip kömür partiküllerinden oluşan şlam, yüksek askıda katı madde içeriği nedeniyle çevresel açıdan önemli bir atık fraksiyonudur. Bu ince taneli malzeme, çevreye kontrolsüz bırakıldığında yüzey sularında bulanıklık artışına ve sediman yükünün yükselmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle şlam, büyük boyutlu çöktürme (tikiner) havuzlarında toplanmaktadır. Burada flokülant (pıhtılaştırıcı) kimyasallar yardımıyla çöktürülen şlam, filtre pres ünitelerine pompalanarak yüksek basınç altında susuzlaştırılır. Sistemin kullandığı su tekrar yıkama ünitesine gönderilirken, elde edilen susuzlaştırılmış kömür keki, düşük kalorili ancak değerli bir yan ürün olarak Çatalağzı gibi termik santrallere yakıt olarak satılarak ekonomiye geri kazandırılır. Yönetmelikler nezdince bu proses, hem tatlı su tüketimini minimuma indirmekte hem de atıksu deşarjını önleyerek havza bazında oluşabilecek su kirliliğinin önüne geçmektedir (Çevre İzin ve Lisans Yönetmeliği, Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği).

3.3. Atmosferik Baskılar: Zonguldak'ta Hava Kalitesi, Partikül Madde ve Termik Santraller

Zonguldak havzasında kömür madenciliğinin atmosferik ekosistem üzerindeki baskıları, yalnızca ocak içi kazı faaliyetleriyle sınırlı kalmayıp; çıkarılan cevherin yeryüzüne taşınması, lavuarlarda işlenmesi, açık vagonlarla nakliyesi ve nihayetinde bölgede kümelenmiş devasa termik santrallerde yakılması süreçlerini kapsayan çok zincirli ve kronik bir çevresel problem oluşturmaktadır. Kömürün termik santrallerde yanması sonucunda atmosfere salınan kükürtdioksit (SO_2), azot oksitler (NO_x), ince partikül maddeler (PM_{10} ve $PM_{2.5}$) ve ağır metaller, kentsel hava kalitesini düşürmektedir. Ma vd. (2025), kömür yakıtlı güç santrallerindeki yanma süreci boyunca uçucu ağır metallerin (cıva, arsenik, selenyum, kurşun) atmosfere salınım mekanizmalarını inceledikleri çalışmalarında, bu elementlerin partikül maddeler üzerine adsorbe olarak geniş coğrafyalara taşındığını ve ciddi ekolojik riskler yarattığını ortaya koymuşlardır. Zonguldak'ın derin vadilerden ve sarp yamaçlardan oluşan topoğrafik yapısı, bu emisyonların rüzgarla dağılmasını engelleyerek bir inversiyon kalkanı yaratmakta ve kirletici bulutunun doğrudan şehir merkezinin üzerine çökmesine neden olmaktadır. Şekil 5'te Çatalağzı'nda gerçekleştirilen hava kalitesi ölçümlerinde kullanılan PM_{10} ve $PM_{2.5}$ filtrelerinin durumu gösterilmektedir.



Şekil 5. Çatalağzı'nda gerçekleştirilen hava kalitesi ölçümlerinde kullanılan PM₁₀ ve PM_{2.5} filtrelerinin durumu (TMMOB ÇMO, 2018)

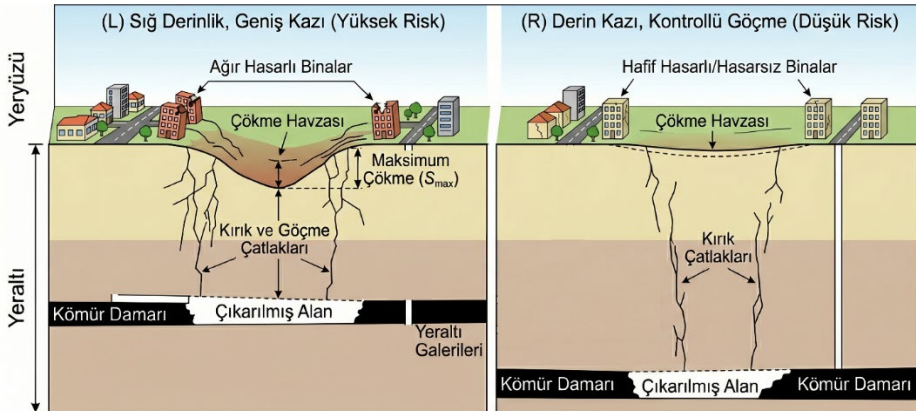
Bu yoğun atmosferik kirliliğin insan sağlığı üzerindeki en trajik ve doğrudan yansıması, kömür tozu ve silika içeren solunabilir partiküllere uzun süreli mesleki veya çevresel maruziyetin bir sonucu olan Kömür İşçisi Pnömokonyozu'dur (CWP - Kara Akciğer Hastalığı). Gelişmiş iş sağlığı ve havalandırma teknolojilerine rağmen, küresel ölçekte yapılan meta-analizler CWP'nin halen maden bölgelerinde en ölümcül meslek hastalığı olmaya devam ettiğini göstermektedir. Liu vd. (2022) tarafından yapılan kapsamlı bir sistematik derleme, dünya genelinde madenciler arasındaki pnömokonyoz prevalansının (yaygınlığının) yıllar içinde azalma eğilimi gösterse de, bölgesel olarak (özellikle yeraltı kömür madenciliğinde) hala %20'lere varan oranlarda seyredildiğini vurgulamaktadır.

Daha güncel epidemiyolojik veriler ise sorunun önemini daha açık şekilde göstermektedir. Küresel Hastalık Yüğü (GBD) verilerine dayanan çalışmada Chen vd. (2025), pnömokonyozun küresel morbidite ve mortalite yükünün, özellikle yeraltı kömür madenciliğine bağımlı bölgelerde halk sağlığı altyapısını zorlayan bir kronik hastalık dalgasına dönüştüğünü kanıtlamıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde kömür işçisi pnömokonyozu kaynaklı

ölümlerin madencilik sektöründe orantısız derecede yüksek olduğu ve "İlerleyici Masif Fibrozis" (PMF) olarak bilinen hastalığın en ağır formunun yeniden dirilişe geçtiği raporlanmıştır (Mazurek vd., 2025). Zonguldak'ta da durum benzerdir; hava kirliliği sadece yer altındaki tahkimat işçisini değil, kirliliğin çıktığı vadilerde yaşayan, madenle doğrudan teması olmayan çocukları ve yaşlıları da pasif birer madenci konumuna düşürmekte, solunum yolu hastalıklarını (KOA, astım) bölgesel bir norm haline getirmektedir.

3.4. Litosferik Etkiler: Tasman, Kömür Pasası (Şist) ve Kül Depolama Yönetimi

Yeraltı kömür madenciliğinin, Zonguldak gibi kentsel yerleşim yerleriyle tam bir dikey kesişim içinde olduğu havzalardaki en belirgin fiziksel ve litosferik etkisi "tasman" (yüzey çöküntüsü) olayıdır. Kömür damarlarının kazılarak boşaltılması ve üretimi tamamlanan galerilerin göçmeye bırakılması, üstteki litolojik tabakaların jeomekanik dengesini bozar. Altun vd. (2010), yeraltı madenciliğinin yüzeysel etkilerini inceledikleri çalışmalarında tasmanın; eğim değişimlerine, zemin gerilmelerine ve yüzey çatlaklarına yol açarak sadece üst yapıları (binalar, yollar, köprüler vb.) parçalamakla kalmadığını, aynı zamanda yeraltı akiferlerinin kırılmasına ve kirlenmesine neden olan tehlikeli "jeolojik afetlerden" biri olduğunu altını çizmektedir. Üzülmüş İşletmesi'nin sığ kotlarda yaptığı kazılar, doğrudan üstündeki kentsel donatıları tehdit eden sinsi ve sürekli bir yer hareketliliği yaratmaktadır. Şekil 6'da yeraltı madenciliğine bağlı olarak gelişen yüzey çökmesi (tasman) mekanizması kesitsel olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. Tasman (Yüzey Çökmesi) Mekanizması Kesiti

Bunun yanı sıra, maden döngüsünün ürettiği devasa katı atıklar litosfer üzerinde muazzam bir baskı oluşturur. Kömür kazısı ve zenginleştirme (yıkama) işlemleri sırasında ortaya çıkan pasa ve lavuar şistleri, genellikle "tehlikesiz atık" olarak etiketlense de devasa hacimlerde depolandıklarında ekosistemi bozarlar. Guo (2017), kömür pasası üzerine yaptığı kapsamlı incelemede, bu malzemenin sadece yüksek kül içeriğine sahip karbonlu bir atık olmadığını; bünyesinde flor (F), arsenik (As), kurşun (Pb) ve cıva (Hg) gibi onlarca toksik eser element barındırdığını belirtmektedir. Bu devasa pasa yığınları atmosferik yağışlara maruz kaldığında, içerdikleri toksik elementler sızıntı suları aracılığıyla toprak profiline ve yeraltı sularına karışır (Guo, 2017). Kömür yanma süreçleri neticesinde açığa çıkan katı atıklar (uçucu kül, taban külü vb.), orijinal kömür matrisinde eser miktarda bulunan inorganik elementlerin yüksek oranlarda zenginleştiği atık formlarıdır. Bu atıklarda yoğunlaşan iz elementlerin çevresel ve sağlık üzerindeki olumsuz etkilerini değerlendirmek amacıyla, Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Araştırma Konseyi (National Research Council - NRC) tarafından toksikolojik ve ekolojik risklere dayanan bir sınıflandırma sistemi oluşturulmuştur (Nalbandian, 2012). Kömür atıklarında bulunan iz elementlerin risk profili ve sınıflandırılması Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2: Kömür Atıklarındaki İz Elementlerin Risk Profili ve Sınıflandırma

Element	Risk Sınıfı (NRC)	Çevresel ve Sağlık Etkileri
Arsenik (As)	Yüksek Endişe	Kanserojen; içme suyuna sızarak cilt ve iç organ kanserlerine yol açar.
Cıva (Hg)	Yüksek Endişe	Nörotoksin; sucul ortamlarda metil cıvaya dönüşerek besin zincirinde biyobirikim yapar.
Selenyum (Se)	Yüksek Endişe	Sucul yaşam için toksik; balıklarda üreme bozukluklarına ve deformasyonlara neden olur.
Kurşun (Pb)	Yüksek Endişe	Sinir sistemi hasarı; özellikle çocuklarda gelişimsel bozukluklar.
Uranyum (U)	Radyoaktif	Böbrek toksisitesi ve radyolojik riskler; bozunma ürünleri (Radyum, Radon) kanserojendir.
Bor (B)	Orta Endişe	Fitotoksisite; bitki büyümesini engeller, tarım arazilerini verimsizleştirir.

Nihai tüketim aşamasında ise kömürün termik santrallerde yakılması sonucunda "uçucu kül", "taban külü" ve Baca Gazı Desülfürizasyon (FGD) atıkları ortaya çıkar. Sadece ABD'de her yıl 130 milyon tonun üzerinde kömür yanma ürünü (CCP) oluşmaktadır (Deonarine vd., 2015). Bu küller, kömürün içerdiği arsenik ve selenyum gibi iz elementlerin yüksek sıcaklıklarda buharlaşıp ardından kül partikülleri üzerinde yoğunlaşmasıyla son derece toksik bir hale gelirler. Schwartz vd. (2018), kömür küllerinden arsenik ve selenyum sızma potansiyelini değerlendirdikleri çalışmalarında, külün kimyasal kompozisyonunun ve depolandığı alanın biyojeokimyasal koşullarının (pH, redoks potansiyeli vb.) yeraltı sularının kirlenmesinde belirleyici olduğunu göstermiştir. Her ne kadar uçucu kül veya FGD alçısı gibi materyaller inşaat veya zemin stabilizasyonu (Yuan vd., 2025) gibi alanlarda geri dönüştürülmeye çalışılsa da, Zonguldak havzasında bu atıkların büyük kısmı halen düzenli veya düzensiz depolama sahalarında litosfere ağır bir yük olarak bırakılmaktadır.

3.5. Sosyo-Ekonomik Tahribat: İş Kazaları, Kaçak Ocaklar ve Adil Dönüşüm İhtiyacı

Zonguldak kömür havzasında ekolojik bozulmanın ana nedeni, çalışanların ve bölgede yaşayanların sağlığını doğrudan tehdit eden güvencesiz çalışma ekosistemidir. Yeraltı madenciliğinin doğasında var olan jeolojik riskler, operasyonel eksikliklerle birleştğinde ölümcül tablolar yaratmaktadır. Kömürleşme sürecinin doğal bir yan ürünü olan ve kömür gözeneklerinde hapsolmuş metan gazının (CH₄) kazı sırasında galeriye aniden boşalması, yeterli havalandırma sağlanmadığında saniyeler içinde ölümcül grizu patlamalarına dönüşmektedir. Liu vd. (2023), kömür madenlerindeki gaz kazalarının nedenlerini analiz ettikleri çalışmalarında, bu felaketlerin yalnızca "doğal bir afet" olmadığını; gaz drenaj teknolojilerinin eksikliği, risk yönetimindeki hatalar ve insan-makine uyumsuzluğundan kaynaklanan "sistemik yönetim zafiyetleri" olduğunu ortaya koymuştur. Yeraltı kömür madenciliği, yüzey madenciliğine kıyasla kaza frekansı, tahkimat göçükleri ve gaz patlamaları açısından en yüksek risk profiline sahip endüstriyel koldur (Sohail, 2025). Şekil 7'de Zonguldak Maden Şehitleri Anıtı gösterilmektedir.



Şekil 7. Zonguldak Maden Şehitleri Anıtı (Zonguldak Maden Müzesi, t.y.)

Ancak Zonguldak havzasının sosyo-ekonomik açıdan olumsuz yönü, resmi TTK sahalarının dışında, kurumsal hiçbir denetime tabi olmayan yasadışı madencilik (kaçak ocak) faaliyetleridir. Gana'daki "galamsey" (yasadışı zanaatkar madencilik) üzerine yapılan sosyo-demografik araştırmalar, bu tür kayıt dışı madencilik faaliyetlerinin tesadüfi olmadığını; derin bir yoksulluk, düşük eğitim seviyesi, alternatif geçim kaynaklarının yokluğu ve yerel halkın çaresizliğinden beslenen yapısal bir kriz olduğunu kanıtlamaktadır (Baddianaah vd., 2022). Yetersiz mühendislik standartlarına sahip bu sahalarda işçiler sigortasız ve korumasız bir şekilde çalışmak zorunda kalmaktadır. Kaçak madencilik, sadece insanları bu şartlarda çalıştırmakta kalmaz; atık sularını arıtmadan derelere deşarj ederek ve düzensiz pasa yığınları oluşturarak bölgedeki kontrolsüz çevresel bozulmayı da derinleştirir.



Şekil 8. Zonguldak'ta Yer Alan Bir Kaçak Maden (TRT Haber, 2020).

4. SONUÇ

Kömür, fosil bir yakıt olarak küresel sanayileşmenin ve ekonomik kalkınmayı başlatmış olsa da, 21. yüzyılın iklim krizi ve ekolojik çöküş gerçeklikleri bağlamında sürdürülebilirliğini tamamen yitirmiştir. Bu kitap bölümünde kapsamlı bir şekilde incelenen Zonguldak TTK Üzülmez İşletmesi vaka analizi, yeraltı kömür madenciliğinin ve buna entegre termik santral süreçlerinin; litosferik çökmelerden yeraltı sularının asitlenmesine, ağır metal liçlerinden atmosferik zehirlenmelere ve pnömokonyoz gibi kitlesel meslek hastalıklarına kadar uzanan, çok boyutlu ve nesiller boyu süren bir tahribat ürettiğini kanıtlamaktadır.

Küresel karbon emisyonlarını sınırlandırmak ve Paris Anlaşması hedeflerine ulaşmak adına, enerji arzında kömürün kademeli olarak terk edilmesi bilimsel bir mutabakattır (IEA, 2022). Ancak, ekonomisi ve sosyokültürel kimliği bir asrı aşkın süredir kömürle harmanlanmış Zonguldak gibi havzalarda bu süreç "şalteri kapatıp gitmek" kadar basit olamaz. Dünya Bankası (2021), kömür bölgelerinde uygulanması gereken stratejiyi "Adil Dönüşüm" olarak tanımlamaktadır. Adil dönüşüm; maden kapanışlarının yıllar öncesinden planlanmasını, eski maden sahalarının ve atık depolama alanlarının ekolojik restorasyonla rehabilite edilmesini (örneğin güneş enerjisi tarlalarına veya rekreasyon alanlarına dönüştürülmesini) ve en önemlisi maden işçilerinin

yeni, yeşil sektörler için yeniden eğitilerek sosyal güvenlik ağlarıyla desteklenmesini zorunlu kılar (World Bank, 2021).

Sonuç olarak, enerji dönüşümü yalnızca atmosferik karbon konsantrasyonunun azaltılmasına yönelik teknik bir müdahale olarak değerlendirilmemelidir. Bu dönüşüm, Zonguldak'ta hava kalitesinin iyileştirilmesi, kirlenmiş su kaynaklarının rehabilite edilmesi, ekosistem hizmetlerinin korunması ve çevresel bozulmadan orantısız biçimde etkilenen toplumsal kesimlerin yaşam kalitesinin artırılması açısından bütüncül bir gereklilik taşımaktadır. Bu bağlamda enerji dönüşümü, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması, halk sağlığının korunması ve sosyal adalet ilkelerinin güçlendirilmesi bakımından öncelikli bir ekolojik ve etik zorunluluk olarak ele alınmalıdır.

KAYNAKÇA

- Altun, A. O., Yılmaz, I., & Yildirim, M. (2010). A short review on the surficial impacts of underground mining. *Scientific Research and Essays*, 5(21), 3206-3212.
- Atabey, E. 2010. Türkiye’de İnsan Kaynaklı (antropojenik) unsurlar ve çevresel etkileri MTA Yerbilimleri ve Kültür Serisi-7, Kuban Matbaacılık Yayıncılık-Ankara.
- Baddianaah, I., Baatuuwie, B. N., & Adongo, R. (2022). Socio-demographic factors affecting artisanal and small-scale mining (galamsey) operations in Ghana. *Heliyon*, 8(2), e09039.
- Chen, Y., Liu, D., Ji, H., Li, W., & Tang, Y. (2025). Global and regional burden of pneumoconiosis, 1990-2021: An analysis of data from the global burden of disease study 2021. *Frontiers in Medicine*, 12, 1559540.
- Çevre İzin ve Lisans Yönetmeliği, Resmî Gazete Tarihi: 10.09.2014 Resmî Gazete Sayısı: 29115
- Deonarine, A., Kolker, A., & Doughten, M. W. (2015). Trace elements in coal ash (Fact Sheet 2015-3037). U.S. Geological Survey.
- Elmas 67. (2023, 19 Aralık). TTK'ya 58 milyon kazandıran kahramanlar! <https://www.elmas67.com/ttkya-58-milyon-kazandiran-kahramanlar>, Erişim Tarihi: 19.04.2026
- Emekwisia, C. C., Ogunsiji, T. O., Bauna, F. K., Otsabomhe, G. O., Akinbamilowo, O. O., Olagunju, A. R., & Akagu, E. E. (2025). Comparative analysis of environmental impacts associated with surface and underground mining operations. *South Asian Research Journal of Engineering and Technology*, 7(4), 121-125.
- Faulkner, B. B., & Skousen, J. G. (1994). Treatment of acid mine drainage by passive treatment systems. *Journal of the American Society of Mining and Reclamation*, 2, 250-257.

- Feulner, G. (2017). Formation of most of our coal brought Earth close to global glaciation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(43), 11333-11337.
- Fitzer, E., Köchling, K.-H., Boehm, H. P., & Marsh, H. (1995). Recommended terminology for the description of carbon as a solid. *Pure and Applied Chemistry*, 67(3), 473-506.
- Ghose, M. K. (2004). Effect of opencast mining on soil fertility. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 63(12), 1006-1009.
- Guo, S. (2017). Trace elements in coal gangue: A review. In *Contributions to Mineralization. InTech*.
- Hartman, H. L., & Mutmanský, J. M. (2002). *Introductory mining engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Hobbs, P., Oelofse, S. H. H., & Rascher, J. (2008). Management of environmental impacts from coal mining in the Upper Olifants River catchment as a function of age and scale. *International Journal of Water Resources Development*, 24(3), 417-431.
- International Energy Agency. (2022). *Coal in net zero transitions: Strategies for rapid, secure and people-centred change*.
- International Energy Agency. (2023). *Coal 2023: Analysis and forecast to 2026*.
- International Energy Agency. (2024). *Coal 2024: Analysis and forecast to 2027*.
- International Energy Agency. (2025). *Coal 2025: Analysis and forecast to 2030*.
- Ketris, M. P., & Yudovich, Y. E. (2009). Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 135-148.

- Liu, W., Liang, R., Zhang, R., Wang, B., Cao, S., Wang, X., Ma, J., Wang, D., & Chen, W. (2022). Prevalence of coal worker's pneumoconiosis: A systematic review and meta-analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 88690-88698.
- Liu, Y., Liang, Y., & Li, Q. (2023). Cause analysis of coal mine gas accidents in China based on association rules. *Applied Sciences*, 13(16), 9266.
- Ma, R., Wang, H., Sun, Z., & Gu, X. (2025). Release and ecological risks of heavy metals during coal combustion in coal-fired power plants. *Applied Sciences*, 15(21), 11360.
- Mazurek, J. M., Dodd, K. E., Syamlal, G., Blackley, D. J., & Weissman, D. N. (2025). Coal workers' pneumoconiosis-associated deaths—United States, 2020-2023. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report*, 74(41).
- Nalbandian, H. (2012). Trace element emissions from coal (Rapor No. CCC/203). IEA Clean Coal Centre
- Nelsen, M. P., DiMichele, W. A., Peters, S. E., & Boyce, C. K. (2016). Delayed fungal evolution did not cause the Paleozoic peak in coal production. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(9), 2442-2447.
- Rambabu, K., Banat, F., Pham, Q. M., Ho, S.-H., Ren, N.-Q., & Show, P. L. (2020). Biological remediation of acid mine drainage: Review of past trends and current outlook. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2, 100024.
- Ross, M. R. V., McGlynn, B. L., & Bernhardt, E. S. (2016). Deep impact: Effects of mountaintop mining on surface topography, bedrock structure, and downstream waters. *Environmental Science & Technology*, 50(4), 2064-2074.
- Schwartz, G. E., Hower, J. C., Phillips, A. L., Rivera, N., Vengosh, A., & Hsu-Kim, H. (2018). Ranking coal ash materials for their potential to leach

- arsenic and selenium: Relative importance of ash chemistry and site biogeochemistry. *Environmental Engineering Science*, 35(7), 728-738.
- Schweinfurth, S. P. (2009). An introduction to coal quality. In B. S. Pierce & K. O. Dennen (Eds.), *The National Coal Resource Assessment Overview* (U.S. Geological Survey Professional Paper 1625-F). U.S. Geological Survey.
- Sohail, M. (2025). Comparison of surface and underground mining methods in terms of cost and safety. *Spectrum of Engineering Sciences*, 3(9).
- Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Resmî Gazete Tarihi: 31.12.2004 Resmî Gazete Sayısı: 25687
- TMMOB Çevre Mühendisleri Odası. (2018). Zonguldak-Çatalağzı hava kalitesi değerlendirme raporu, 19s..
- TRT Haber. (2020, 23 Ocak). Zonguldak'ta 3 günde 27 kaçak maden imha edildi. <https://www.trthaber.com/haber/turkiye/zonguldakta-3-gunde-27-kacak-maden-imha-edildi-456019.html>, Erişim Tarihi: 16.04.2026
- Więckol-Ryk, A., Pierzchała, Ł., Bauerek, A., & Krzemień, A. (2023). Minimising coal mining's impact on biodiversity: Artificial soils for post-mining land reclamation. *Sustainability*, 15(12), 9707.
- World Bank Group. (2021). *The World Bank's approach to just transition for all: Methodology for energy transition in coal regions*.
- Younger, P. L. (2001). Mine water pollution in Scotland: Nature, extent and preventative strategies. *Science of the Total Environment*, 265(1-3), 309-326.
- Yuan, K., Xie, W., Gao, X., Li, X., & Liu, Q. (2025). From waste to strength: The role of FGD gypsum in loess stabilization and its environmental benefits. *iScience*, 28, 113909.
- Zipper, C., Skousen, J., & Jage, C. (n.d.). *Passive treatment of acid-mine drainage* (Publication 460-133). Virginia Cooperative Extension.

Zonguldak Maden Müzesi (t.y.), <https://zonguldakmadenmuzesi.com>, Erişim
Tarihi: 19.04.2026

BÖLÜM 5

İPLİK BOBİNİ KURUTMA SİSTEMLERİNDE HAZNE VE SEPARATÖR ÇIKIŞ SICAKLIKLARININ ÇOK KATMANLI ALGILAYICI (MLP) İLE MODELLENMESİ

Prof. Dr. Uğur AKYOL¹, Dr. Öğr. Üyesi Halil Nusret BULUŞ²,
Prof. Dr. Soner ÇELEN³

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.21208686>

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Tekirdağ, Türkiye. uakyol@nku.edu.tr, orcid id: 0000-0003-3707-0929

² Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Tekirdağ, Türkiye. nbulus@nku.edu.tr, orcid id: 0000-0003-1844-6484

³ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Tekirdağ, Türkiye. scelen@nku.edu.tr, orcid id: 0000-0001-5254-4411

1. GİRİŞ

1.1. Endüstriyel Kurutma ve Tekstil Sektöründeki Önemi

Kurutma işlemi, en temel tanımıyla bir ürünün iç yapısında bulunan sıvının termal enerji (ısı) kullanılarak uzaklaştırılmasıdır. Günümüz modern endüstrisinde bu işlem sadece tekstilde değil; gıda, kâğıt ve ilaç gibi üretimin süreklilik arz ettiği pek çok kritik sektörde de yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak her endüstriyel süreçte olduğu gibi, kurutma operasyonlarında da operasyonel maliyetlerin düşürülmesi, ürün kalitesinin korunması ve maksimum verimliliğe ulaşılması çözülmesi gereken en büyük problemler olarak üreticilerin karşısına çıkmaktadır.

Tekstil materyalleri (kumaşlar veya iplikler), üretim süreçlerindeki çeşitli ıslak terbiye aşamalarında kendi kuru ağırlıklarının yaklaşık %150'si ile %300'ü gibi çok yüksek oranlarda su tutabilme kapasitesine sahiptir (Akyol, 2007). Boyama ve bitim işlemleri bittikten sonra bu yüksek nemin üründen uzaklaştırılması gerekir; bu arındırma süreci terbiye operasyonlarının terminal (son) halkasını oluşturur (Durak, 2012). Kurutma aşaması, tekstil terbiye operasyonları içerisinde en maliyetli ve en fazla zaman alan süreçlerin başında gelmektedir. Bu yüzden, farklı kurutma parametrelerini göz önünde bulundurarak sürecin matematiksel ve fiziksel olarak modellenmesi hayati bir önem taşır. Doğru şekilde yönetilen ve yürütülen bir dehidrasyon süreci, nihai ürünün kalitesini korumak ve tekstil malzemesinin uzun vadeli muhafazasını sağlamak için en başarılı yöntemlerden biridir (Durak, 2012).

Tekstil sektörü küresel makroekonomide çok önemli bir yere sahip olsa da boyama, yıkama ve durulama gibi süreçler nedeniyle aşırı derecede enerji yoğun bir yapıya sahiptir. Kurutma aşaması, terbiye operasyonları içerisinde en pahalı ve en çok zaman alan işlemlerden biridir. Son yıllarda artan enerji maliyetleri ve karbon emisyonunu azaltma zorunlulukları, işletmeleri enerji tasarruflu yenilikçi yaklaşımlara yöneltmektedir.

1.2. İplik Bobinleri ve Dehidrasyon Mekanizmaları

Tekstil liflerinin veya filamentlerinin bükülmesiyle oluşturulan sürekli hatlara iplik denir. Bu ipliklerin delikli, silindirik veya konik taşıyıcılar üzerine belirli bir yoğunlukta sarılmasıyla elde edilen malzemeler ise iplik bobini olarak adlandırılır (Karakoca, 2017).

Kurutma sistemlerinde süreç, ortamın doğal havası kullanılarak yürütülebileceği gibi yapay olarak ısıtılmış hava akımları vasıtasıyla da yönlendirilebilir. Endüstride uygulanan dehidrasyon işlemleri temelde iki ana sınıfa ayrılmaktadır:

- *Mekanik Ön Kurutma:* Santrifüj kuvvetleri gibi fiziksel etkilerden yararlanarak iplik veya kumaş üzerindeki serbest suyun büyük bir kısmının mekanik olarak dışarı atılması işlemidir. Mekanik yöntemler tek başına tam bir kuruma sağlamak için yetersizdir. Ancak termal kurutmanın getireceği yüksek maliyetleri ve zaman kayıplarını azaltmak adına, mekanik aşamada iplikten olabildiğince fazla suyun uzaklaştırılması kritik bir gerekliliktir.
- *Termal/Konvektif Son Kurutma:* Mekanik ön kurutmadan çıkan ve hâlâ yüksek oranda nem barındıran tekstil ürünleri, hedef kütsesel nem oranına ulaşması için bu aşamaya alınır. Bu aşamadaki temel amaç, malzemenin iç matrisine kimyasal olarak bağlı olan ve korunması gereken doğal (higroskopik) nem dengesine zarar vermeden sadece fazla su fazını ortadan kaldırmaktır. Yarı mamul iplikte kalan nem miktarının doğru analiz edilmesi, uygulanacak olan kurutma metodunun başarısını ve enerjisel verimliğini doğrudan etkileyen bir anahtar parametredir.

Yaygın olarak kullanılan sıcak havalı (konvektif) kurutma sistemlerinde süreç; ısıtılmış havanın iplik bobininin delikli olan iç çekirdeğinden (merkezinden) dış çevre çeperine doğru basınçla zorunlu olarak geçirilmesi ilkesine dayanır. Bu işlem, kurutma havasının sıcaklığına ve bağlı nemine bağlı olarak bobin yapısı içerisinde dinamik bir "denge nem içeriği" kurulana kadar kesintisiz devam eder. Bu operasyon, eş zamanlı gerçekleşen kompleks bir ısı ve kütle transferi mekanizması ile karakterize edilir.

Kurutma işleminin ne kadar süreceği (toplam süre) ve nemin uzaklaşma hızı (kurutma hızı) doğrudan şu parametrelere bağlıdır

- İşlem havasının sıcaklığı, akış hızı/debisi ve nem oranı,
- Tekstil malzemesinin cinsi ve yapısal özellikleri,
- Bobinin maruz kaldığı açık yüzey alanı, geometrisi ve iplik sarım yapısının gözeneklilik (porozite) profili.

Günümüz tekstil işletmelerinde sıcak havalı kurutma kombinasyonlarının yanı sıra; Kızılötesi Radyasyon (Infrared), Mikrodalga

kurutma, Radyo Frekansı, Vakumlu kurutma ve Isı Pompası destekli kurutma gibi farklı termal teknolojilerden ve makinelerden de yararlanılmaktadır. Kurutma operasyonunun en temel hedefi; en yüksek kurutma hızına ulaşarak zamanı optimize etmek ve minimum enerji tüketimi ile hedeflenen malzeme karakteristiklerini (kalitesini) elde etmektir.

1.3. Matematiksel Modelleme ve Yapay Zekâ Tabanlı Çözümler

Çok sayıda değişken parametreyi (sıcaklık, hız, nem, malzeme yapısı vb.) içinde barındıran kurutma süreçlerinin matematiksel denklemlerle modellenmesi, sistemin genel davranışını anlamak ve kontrol etmek adına büyük bir operasyonel kolaylık sağlar. Kurutma kinetiğinin matematiksel olarak doğru formüle edilmesi; liflerin yapısal kalitesini, mukavemetini ve fiziksel bütünlüğünü bozmadan süreyi kısaltacak optimizasyonların yapılabilmesine olanak tanır. Bu sayede hem endüstriyel enerji giderleri minimuma indirilir hem de malzeme kusurlarından kaynaklanabilecek finansal kayıpların önüne geçilir.

Tarım ve endüstriyel ürün işleme sektörlerinde toprak işlemeden bitki koruma ve nakliye kadar uzanan süreçler büyük oranda makineleşmiştir. Söz konusu süreçlerin optimizasyonunda YSA ve ANFIS gibi yapay zekâ teknikleri, analitik varsayımlara gerek duymadan doğrudan veri odaklı tahmin yürütebildikleri için yüksek başarı sergilemektedir. İnsan beyninin öğrenme ve kalıp çıkarma yetisini taklit eden bu algoritmalar, eldeki girdi veri seti ile buna karşılık gelen çıktılar arasında fonksiyonel bir bağ kurarak çalışır (Mousavifard vd., 2015; Bulus, 2024).

Son yıllarda, çok parametrelili bu denklemleri daha hızlı çözmek, kurutma maliyetlerini ve zamanını daha da aşağı çekmek amacıyla yapay zekâ tabanlı modern tahmin modelleri endüstride yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu akıllı modeller arasında özellikle Yapay Sinir Ağları (YSA) ön plana çıkmaktadır (Bulus ve Çelen, 2025; Moralar, 2024).

Yapay zekâ yöntemlerinin endüstriyel süreçlerdeki temel fonksiyonları ve karakteristikleri şu şekildedir:

Geniş Uygulama Alanı: Yapay zekâ mimarileri günümüzde parametre kestirimi, deneysel verilerin değerlendirilmesi, anlık durum izleme (proses takibi), arıza teşhisi, sınıflandırma, kalite derecelendirme, otomatik kontrol ve

optimizasyon gibi pek çok operasyonda yüksek başarı yüzdesiyle çalıştırılmaktadır.

Veri Odaklı Yapı: Tüm yapay zekâ metotları tamamen veri odaklı (data-driven) prensiplerle çalışır. Bu sistemler, geliştirildikleri ve eğitildikleri veri setlerinin sınırları (lojistik aralığı) dahilinde anlamlı sonuçlar üretir ve bilinen girdi değişkenlerine dayanarak bilinmeyen çıktı sonuçlarını tahmin etmeyi hedefler.

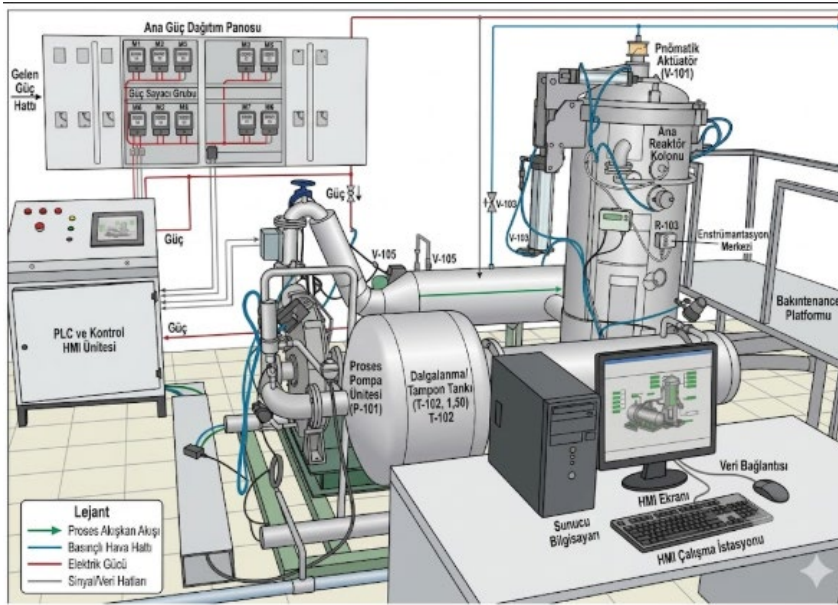
YSA Çalışma Mantığı: YSA, doğrudan insan beyninin moleküler düzeydeki çalışma mekanizmasını ve biyolojik sinir hücrelerinin işlevlerini matematiksel olarak taklit etmek amacıyla tasarlanmış sistemlerdir. Yapay nöronların birbirine bağlanması ve belirli transfer fonksiyonlarını çalıştırması esasına dayanır. Bu gelişmiş yapay zekâ mimarisi; sistemlerin kendi kendine öğrenmesi, veriler arası gizli ilişkileri kurması, benzer verileri sınıflandırması, genelleme yapması, karmaşık veri setlerinden özellik çıkarması ve süreç optimizasyonu gerçekleştirmesi gibi kritik adımları kolaylaştırarak endüstriyel tasarımlara esneklik sağlar (Buluş vd., 2024).

1.4. Araştırmanın Kapsamı ve Amacı

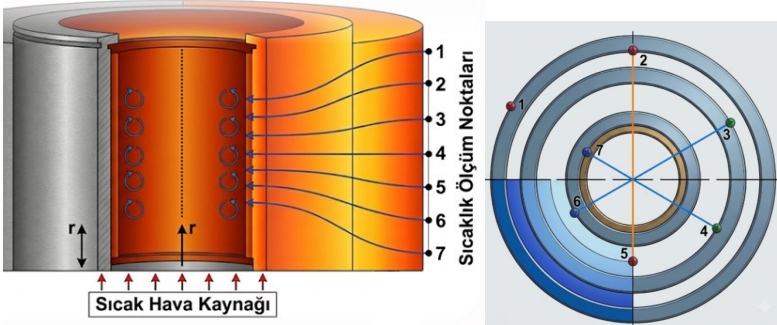
Bu çalışmanın temel amacı, 1 bar sabit basınç ve 100°C hedef sıcaklık koşulları altında gerçekleştirilen ısıl işlem sürecinde, zamana bağlı karmaşık ısı ve kütle transferi mekanizmalarını Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanarak modellemektir. Geliştirilen yapay zeka modelinde; hazne giriş sıcaklığı ve zaman parametreleri ile sistemin ısıl davranışını ve kurutma/işlem performansını karakterize eden 7 farklı bobin noktası üzerindeki anlık sıcaklık değerleri **girdi (input)** olarak tanımlanırken, hazne çıkış sıcaklığı ve separatör çıkış sıcaklığı **çıktı (output)** değişkenleri olarak belirlenmiştir. Bu YSA modeli sayesinde, deneysel olarak ölçülmesi zaman alıcı ve yüksek maliyetli olan katmanlar arası sıcaklık dağılımları ve dinamik kütle kayıpları, minimum hata ve yüksek hassasiyetle tahmin edilebilecektir. Sonuç olarak çalışma, endüstriyel bobin işleme süreçlerinde sistem dinamiklerinin gerçek zamanlı izlenebilmesini, enerji verimliliğinin optimize edilmesini ve deneysel süreçlere ihtiyaç duyulmadan sistem davranışının önceden simüle edilebilmesini hedeflemektedir.

2. DENEYSEL DÜZENEK VE METOT

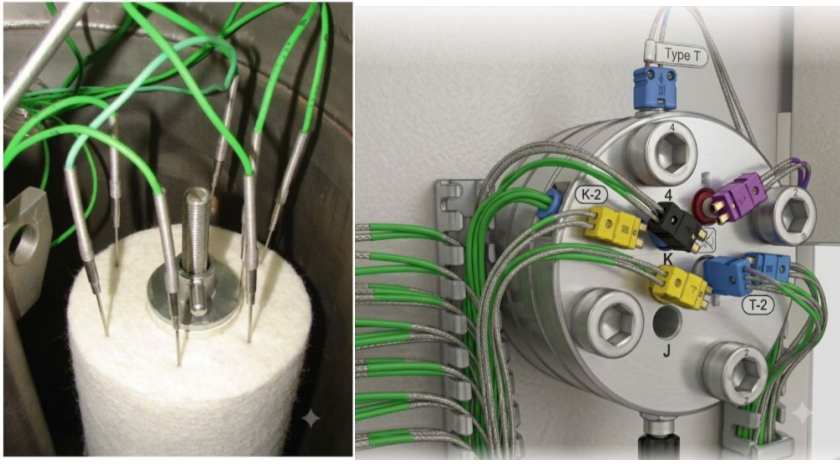
Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi bünyesindeki deney düzeneğinde (Şekil 2.1), yün iplik bobinlerinin kurutulması sıcak hava yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Basınç farkından yararlanan bu sistemde, sıcak havanın yalnızca bobinlerin içinden geçmesi sağlanarak içeriden dışarıya doğru bir kurutma mekanizması uygulanmıştır. Deneyler esnasında sıcak hava debisi 450 m³/saat, hava sıcaklığı 100 °C ve etkin basınç 1 bar olarak sürdürülmüştür. Üzerinde hava akışına izin veren delikler barındıran polietilen bobinler, 35 mm iç çapa ve 150 mm uzunluğa sahiptir.



Şekil 2.1 Bobin kurutma sistemi



Şekil 2.2 Deneylerde kurutulan iplik bobininin şematik gösterimi



Şekil 2.3 İplik bobinlerinin içerisine yerleştirilen termokupllar

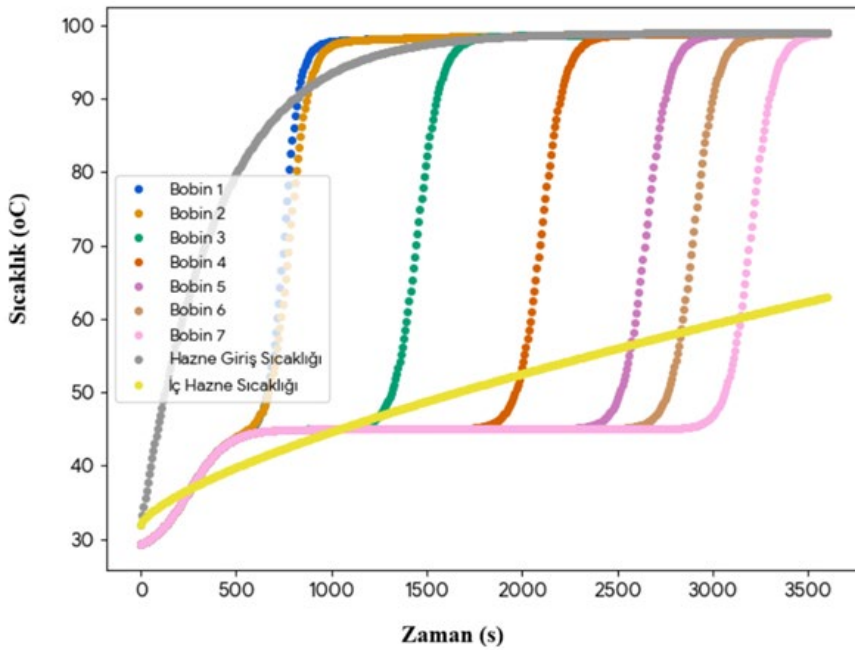
Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te belirtildiği üzere, termokupllar sisteme eşit mesafelerde ve farklı açılarla konumlandırılmıştır. Deneyler sırasında bobin boyu boyunca kayda değer bir sıcaklık dalgalanması gözlenmediğinden, oluşturulan matematiksel modelde sadece radyal yöndeki değişimler dikkate alınmıştır. Kurutma periyodu boyunca toplam 7 farklı ölçüm noktasından alınan sıcaklık verileri kesintisiz olarak kaydedilmiştir. Kurutma havasının sıcaklığı, PID kontrollü ısıtıcılar vasıtasıyla oransal olarak denetlenmekte ve ısınan hava, bobinlerin yer aldığı portmantiyer ünitesine sevk edilmektedir. Bobin içi sıcaklık takibi, ipik bobinlerinin içine radyal doğrultuda ve eşit aralıklarla yerleştirilen, doğrudan PLC bağlantılı termokupllar ile gerçekleştirilmektedir. Diğer taraftan, kurutma esnasındaki kütle kaybını ve dolayısıyla uzaklaştırılan nem miktarını belirlemek amacıyla 600 kg (200×3) kapasiteli bir loadcell (yük hücresi) kullanılmıştır. Portmantiyerden elde edilen veriler, sistem yanındaki dijital göstergeden anlık izlenebildiği gibi, 0–10V/4–20mA analog çıkış ya da dijital veri biçiminde uzak bir merkeze de aktarılabilir. Süreç boyunca bobinden uzaklaşan nem miktarı, bilgisayar ekranı üzerinden eş zamanlı olarak takip edilmiştir (Toraman, 2011).

3. SONUÇLAR VE ANALİZ

Literatürde kuruma verilerinin YSA modellemesi MATLAB ortamında yapılmış çalışmalar yer almaktadır (Buluş vd., 2023). Ancak bu çalışmada YSA modellemesi için Python programlama dili kullanılmıştır.

3.1 YSA Girdilerinin Sisteme Etkisi ve Termal Karakterizasyon

Şekil 3.1’ de, kurutma uygulaması sırasında zamana bağlı olarak değişen sıcaklık değerleri deneysel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Termal işlem sırasında bobinlerin, hazne girişinin ve iç haznenin zamana bağlı sıcaklık değişimleri

Sabit 1 bar basınç altında yürütülen deneysel süreçte, modelin temel girdilerinden biri olan hazne giriş sıcaklığının 100°C hedef değerine doğru gösterdiği hızlı artış, sistemin termal tahrik gücünü doğrudan belirlemiştir. Sürecin ilk 500 saniyesinde giriş sıcaklığının dik bir eğriyle 90°C seviyelerine ulaşması, zamana (time) bağlı olarak hazne içine aktarılan ısı akısını artırmıştır. Diğer bir girdi parametresi olan zamanın ilerlemesiyle birlikte, hazne iç

sıcaklığı daha kararlı ve kademeli bir artış sergileyerek deney sonunda 63°C mertebelerine ulaşmıştır. Girdilerdeki bu değişimlerin, çıktı değişkenleri üzerinde zamana yayılı ve doğrusal olmayan karmaşık etkiler yarattığı görülmektedir.

Modelin en kritik çıktılarından olan 7 adet bobin üzerindeki sıcaklık değerleri (Bobin 1 - Bobin 7), ısı transferinin malzeme içindeki ilerleyişini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Sürecin başında tüm bobin çıktıları benzer bir ısınma ivmesi yakalamış ve yaklaşık 40°C civarında bir duraklama (plateau) evresine girmiştir. Bu evre, malzeme bünyesindeki nemin uzaklaştırılması veya faz değişimi gibi kütle transferi süreçlerinin getirdiği ısıl kararlılığı temsil etmektedir. Zaman girdisinin artışına paralel olarak, ısı kaynağına veya dış katmana daha yakın olan Bobin 1 ve Bobin 2 çıktıları 700. saniyede keskin bir yükselişle 100°C sınırına ulaşırken, merkeze en yakın olan Bobin 7 çıktısı bu kırılımı ancak 3.000. saniyeden sonra gerçekleştirmiştir. Deney sonunda (3.600 s) tüm bobin içi sıcaklık çıktılarının ~100°C seviyesinde doyuma ulaşması, malzemenin tamamen ısıl dengeye geldiğini kanıtlamaktadır.

3.2 Hazne Çıkış Sıcaklığı ve Separatör Çıkış Sıcaklığı Çıktısı ve YSA Model Başarısı

Sıcaklık profillerindeki bu zamana bağlı katmanlı değişim, modelin bir diğer önemli çıktısı olan Hazne Çıkış Sıcaklığı ve Separatör Çıkış Sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Bobinlerin ardışık olarak ısıl doyuma ulaşması ve kuruma evrelerini tamamlaması, sistemdeki hazne çıkış sıcaklığı ve separatör çıkış sıcaklığının da zamanla değişkenlik gösterdiğine işaret etmektedir. Giriş sıcaklığı, zaman, basınç ve 7 farklı noktadaki sıcaklık dağılımı girdilerini kullanarak, hazne çıkış sıcaklığı ve separatör çıkış sıcaklığını tahmin eden YSA modelinin, bu ani sıcaklık kırılımlarını ve kararlı duraklama evrelerini yüksek bir korelasyonla yakalayabildiği görülmüştür. Sonuçlar, girdiler ile dinamik çıktılar arasındaki termal ilişkinin yapay sinir ağları vasıtasıyla başarılı bir şekilde modellendiğini ve karmaşık endüstriyel kurutma/ısıl işlem süreçlerinin izlenmesinde bu yaklaşımın yüksek hassasiyet sunduğunu ortaya koymaktadır.

3.3 Tahmin Başarısı Değerlendirme Ölçütleri

Bu çalışmada, elde edilen tahminlerin deneysel verilerle ne denli uyduğunu tespit etmek amacıyla belirli performans değerlendirme yöntemlerine başvurulmuştur. Bu doğrultuda; Kök Ortalama Kare Hata (RMSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Belirlenlik Katsayısı (R^2) metrikleri kullanılmıştır (Levent vd., 2023).

RMSE

Tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki mesafeyi mutlak bir büyüklük olarak ortaya koyan RMSE (Eşitlik 3.1), tahmin başarısını ölçmede en sık tercih edilen kriterlerden biridir. Özü itibarıyla tahmin hatalarının (kalıntıların) standart sapmasını ifade eder. Sıfır ile sonsuz arasında değerler alabilen bu metriğin sıfıra yaklaşması, modelin yüksek bir tahmin doğruluğuna ulaştığını gösterir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n e_j^2}{n}} \quad (3.1)$$

MAE

Ölçekten bağımsız olması ve sonuçların kolayca yorumlanabilmesi nedeniyle MAE (Eşitlik 3.2), tahmin hassasiyetini değerlendirmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Anlaşılması ve açıklanması oldukça pratiktir. Örneğin; bir modelin MAE değerinin %10 çıkması, yapılan tahminlerin gerçek değerlerden ortalama olarak %10 oranında saptığı anlamına gelir.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |o_i - t_i| \quad (3.2)$$

R-kare

Doğrusal regresyon modellerinde bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişkendeki değişimi ve çeşitliliği ne ölçüde açıklayabildiğini gösteren bir ölçüttür (Eşitlik 3.3). R^2 katsayısı, modele yeni bağımsız değişkenler eklendikçe bu değişkenler gereksiz veya etkisiz olsa bile— sürekli yükselme eğilimindedir. Bu durum, bazen modele ihtiyaç duyulmayan anlamsız değişkenlerin de dahil edilmesine yol açabilir.

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (o_i - t_i)^2}{\sum_{i=1}^N (t_i)^2} \right) \quad (3.3)$$

3.4 YSA Tabanlı Tahmin Sonuçları

Hazne çıkış sıcaklığı ve separatör çıkış sıcaklığı değerlerini modellemek için bir Yapay Sinir Ağı modeli geliştirilmiştir. Bu model girdi olarak 1 bar basınç ve 100°C sıcaklık değerinin 3600 sn boyunca 10'ar saniye aralıklarla ölçülmüş 7 bobin iç sıcaklığı değerini almakta, bu girdiler ile de hazne çıkış sıcaklığı ve separatör çıkış sıcaklığı değerini çıktı olarak hesaplamaktadır.

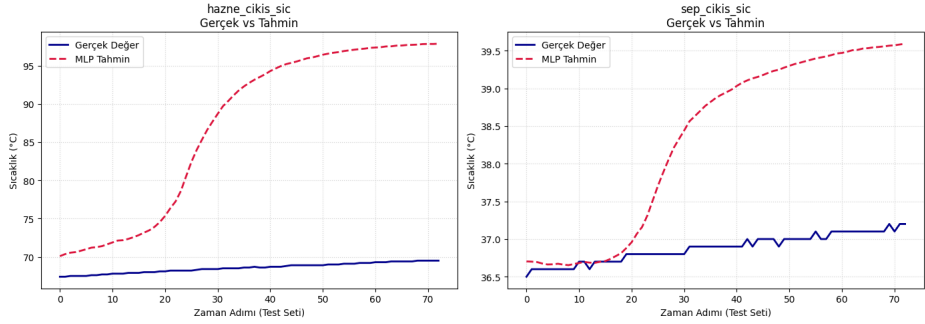
Kurulan bu baseline modelin R^2 , MAE ve RMSE değerleri hesaplanarak, sonucun optimize edilmesi için zaman serilerinin modellenmesi işleminde sıklıkla kullanılan özellik mühendisliği ile optimize edilmiştir. Model oluşturulurken eldeki 361 adet veri satırı 80% eğitim ve 20% test olarak ikiye bölünmüştür.

Kurulan baseline modele ait başarımlar metrikleri test verisi üzerinde hesaplanmış ve Tablo 3.1'te verilmiştir.

Tablo 3.1 Test Veri Seti Üzerinde Temel YSA Modelinin Performans Ölçütleri

Çıktı	R^2	RMSE	MAE
Hazne Çıkış Sıcaklığı	-1131.9467	21.2012	18.5913
Seperatör Çıkış Sıcaklığı	-92.6457	1.7521	1.4406

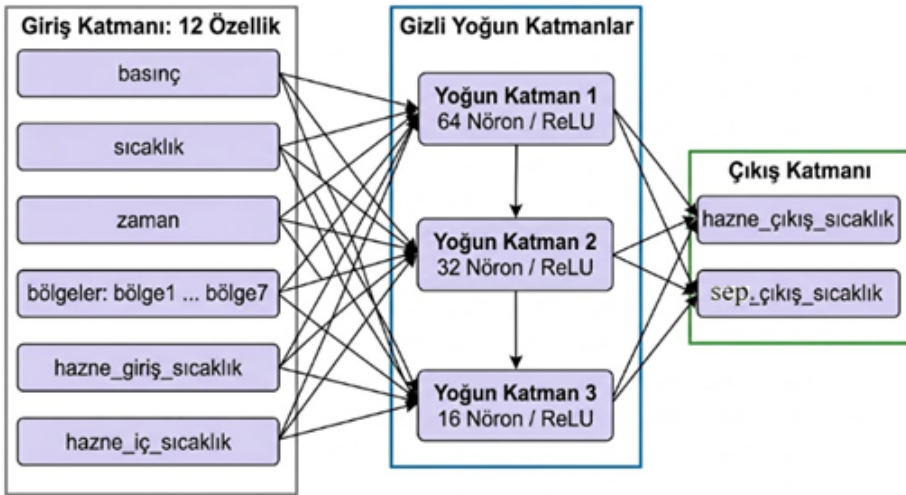
Her iki çıktı için elde edilen tahmin değerleri ile gerçek değerler arasındaki ilişki Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Tahmin – gerçek değerler arası ilişki

R^2 değerinin sağlıklı bir modelde 0.0 – 1.0 arası olması, 1.0'a yakınsamanın da modelin doğru çalıştığını göstermesi beklenmektedir. Negatif değerler ise modelin yatay bir ortalama çizgisi çizmekten bile daha kötü tahmin yaptığını göstermektedir.

Çok katmanlı algılayıcılar (MLP) ileri beslemeli sinir ağı (Feedforward Neural Network) dendiğinde akla gelen ilk mimarilerdendir. Kurulan baseline modele ait çok katmanlı algılayıcı (MLP) modelinin blok şeması Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Baseline modele ait MLP şeması

Kurutma prosesinin doğası gereği, zaman ilerledikçe (zaman sütunu 0'dan 3600'e doğru sürekli artmaktadır) bobin sıcaklıkları ve hazne sıcaklıkları da sürekli yükselmektedir. Model, eğitim setindeki (0 - 2880 sn arası) düşük

sıcaklıkları öğrenmiştir. Ancak test setine geçtiğinde (2880 - 3600 sn arası), hiç görmediği yüksek sıcaklık değerleriyle karşılaşmıştır. Modelin zaman girdisine bakarak doğrusal olmayan bir tahminde bulunmaya çalıştığı ama trendi dışarıya doğru uzatamadığı anlaşılmaktadır.

Bu sorunu çözmek için sadece t anındaki değerin değil, $t-1$ ve $t-2$ anındaki değerlerin de modele verilmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Lag (gecikme) olarak ifade edilen bu değerlerin modele sunulması, zaman serilerinde sıklıkla kullanılan bir çözümdür.

Buna ilave olarak zaman serisindeki trend durumunu ortadan kaldırmak ve veriyi durağanlaştırmak için zaman değerleri arasındaki sıcaklık farkı hesaplanmış ve modele girdi olarak sunulmuştur. Bu mutlak sıcaklık değerini tahmin etmek yerine, bir önceki adıma göre olan değişimin miktarı sorusunu beraberinde getirmektedir.

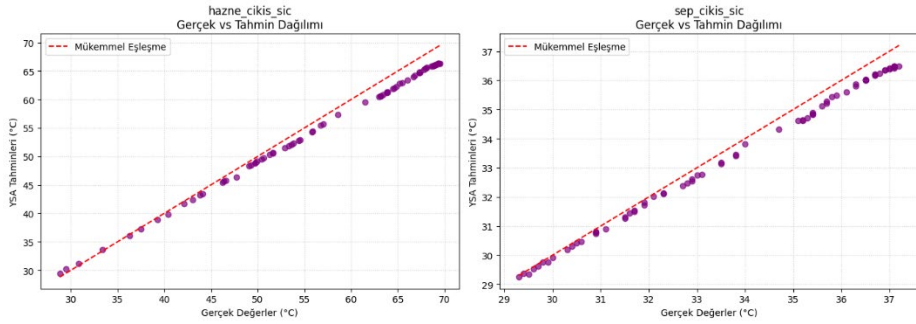
K-Katlı Çapraz Doğrulama (K-Fold Cross Validation) yöntemi, elde binlerce eğitim verisini olmadığı durumlarda önemli bir çözümdür. Bu durumda %80-%20 ayrımı kronolojik olarak değil, veri shuffle edilerek ayrılır. Lag kullanılan veri kümelerinde data leakage riski olduğundan bu yöntem tercih edilmese de, anlık korelasyonların öğrenilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada problem 3 saat sonrasındaki veriyi tahmin etmek değil, şu anki bobin durumlarına ve 10-20 s önceki hallerine bakarak çıkış sıcaklığının ne olduğunu yanıtlamaktır.

K – Fold uygulanmış, lag değerleri eklenmiş ve durağanlaştırılmış veri ile oluşturulan modelde başarımlı metrikleri istenilen sonuçlara ulaşmıştır. Sonuçlar Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Optimize Edilmiş YSA Modelinin Test Verisi Performans Ölçütleri

Çıktı	R^2	RMSE	MAE
Hazne Çıkış Sıcaklığı	0.9691	1.9986	1.7656
Seperatör Çıkış Sıcaklığı	0.9762	0.4031	0.3513

Elde edilen tahmin değerlerinin gerçek değerlere olan yakınsaklığı ise Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

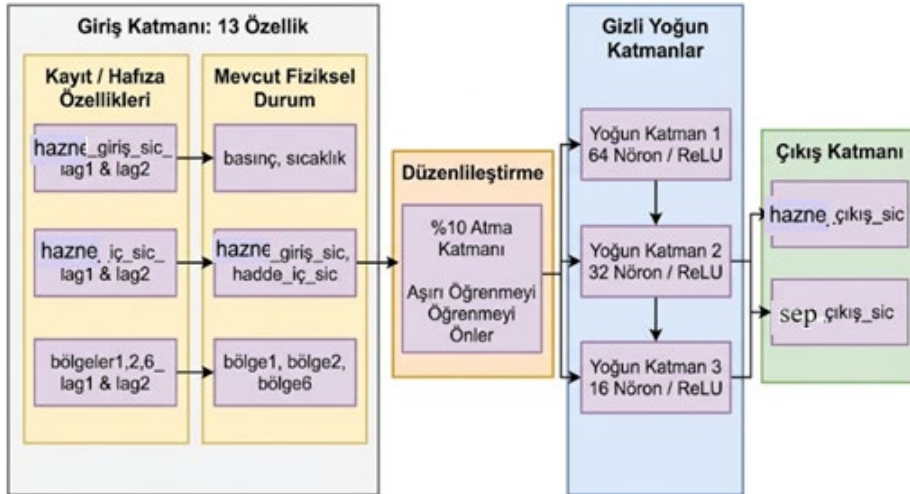


Şekil 3.3. Gerçek – Tahmin değerleri arası ilişki

Elde edilen başarılı sonuçlar modelin geçerliliğini ortaya koymaktadır. Yapılan bu optimizasyon beraberinde 28 girdili bir ağ modelini getirmiştir. Basınç ve sıcaklık dışında kalan 9 girdi (bobin 1-7, hazne giriş sıcaklığı ve hazne iç sıcaklığı girdileri) için lag değerleri de eklendiğinde toplam girdi sayısı 28 olmaktadır.

Permütasyon önem analizi işlemi yapılarak, en düşük etkiye sahip dört bobin (bobin2, bobin5, bobin6, bobin7) ve bunlara ait gecikme (lag) öznitelikleri modelden tamamen çıkarılmıştır. Böylece, başlangıçta 28 olan toplam girdi sayısı 19'a düşürülerek model mimarisi sadeleştirilmiştir.

Oluşturulan çok katmanlı algılayıcı (MLP) modeli şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Optimize modele ait MLP şeması

Permütasyon önem analizi işlemi ile R^2 değerlerinde oluşan fark her bobin için hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerin yüksek olması, R^2 sonucuna o bobinin daha çok etki ettiği anlamına gelmektedir. Bu işlem yapıldıktan sonra bobinler için oluşan R^2 farkları Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Permütasyon önem analizi sonuçları (Her bobin için)

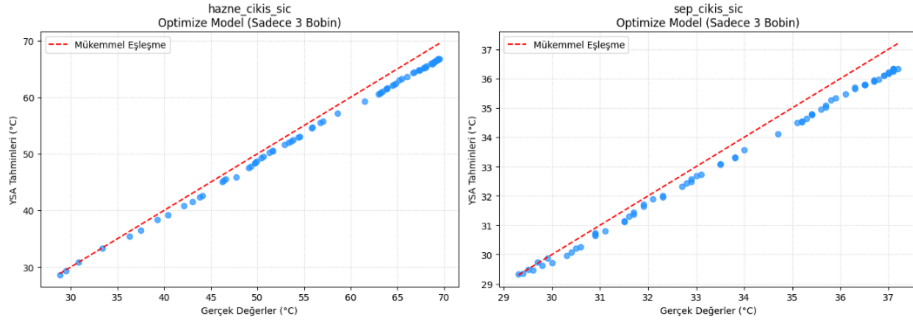
Bobin	Önem Derecesi (R^2 Düşüşü)
bobin1	0.020551
bobin4	0.014999
bobin3	0.014472
bobin5	0.010237
bobin2	0.007109
bobin6	0.001846
bobin7	0.001430

Sadece en önemli 3 bobin sıcaklık değerleri ile bu değerlere ait lag girdileri kullanılarak YSA modeli oluşturulmuş, aynı eğitim ve test oranları ve optimizasyon teknikleri ile başarımleri hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4. 3 Bobinli Optimize YSA Modelinin Test Veri Seti Performans Metrikleri

Çıktı	R^2	RMSE	MAE
Hazne Çıkış Sıcaklığı	0.9698	1.9762	1.8261
Seperatör Çıkış Sıcaklığı	0.9568	0.5432	0.4862

Bu boyut azaltma işlemi, tahmin doğruluğunda anlamlı bir kayba yol açmadığı gibi, yapay sinir ağının gürültüden arınmasını ve daha kararlı bir yapıya kavuşmasını sağlamıştır. Gerçek ve tahmin değerleri arası dağılım şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Gerçek – Tahmin değerleri arası dağılım

Grafik ve tablo incelendiğinde modelden 4 bobin değeri atılmasına rağmen sonucun neredeyse hiç değişmediği görülmüştür. Modelin daha az parametreye bağımlı olması, gerçek zamanlı (real-time) çalışan bir sistemde modelin işlem yükünü azaltmakta, aşırı öğrenme (overfitting) riskini minimuma indirmektedir.

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, tekstil sektöründe yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan yün iplik bobini konvektif kurutma prosesinin termal davranışları ve çıkış sıcaklığı parametreleri, 1 bar sabit basınç ve 100°C hedef sıcaklık koşullarında Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılarak başarıyla modellenmiştir. Deneysel veriler ve ileri beslemeli çok katmanlı algılayıcı (MLP) mimarisi üzerine kurgulanan araştırmada elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- **Zaman Serisi Trend Problemi ve Baseline Model:** Doğrudan ham deneysel veriler ve sürekli artan zaman girdisi kullanılarak oluşturulan temel (baseline) MLP modelinin, test setindeki yüksek sıcaklık trendini dışarıya doğru uzatamadığı (extrapolate edemediği) ve negatif R^2 değerleri üreterek başarısız olduğu görülmüştür. Bu durum, geçici rejim termal süreçlerin veri odaklı modellenmesinde ham zaman parametresinin doğrusal olmayan dinamikleri yakalamada tek başına yetersiz kaldığını ortaya koymuştur.
- **Öznitelik Mühendisliği ve Gecikme (Lag) Etkisi:** Modeldeki trend problemini çözmek ve veriyi durağanlaştırmak amacıyla sisteme geçmiş dönem (t-1 ve t-2) gecikme değerleri ile sıcaklık farkı öznitelikleri eklenmiştir. Bu optimizasyon adımı ve K-Katlı Çapraz

Doğrulama yaklaşımı sayesinde model performansı radikal bir şekilde artmış; hazne çıkış parametresi için R^2 değeri 0.9691'e, separatör çıkış parametresi için ise 0.9762'ye yükseltilmiştir.

- **Permütasyon Önem Analizi ve Sensör/Boyut Azaltma:** Gecikme değerlerinin eklenmesiyle 28'e yükselen girdi sayısı, sistemin karmaşıklığını ve işlem yükünü azaltmak adına permütasyon önem analizine tabi tutulmuştur. Yapılan analiz neticesinde, termal süreç üzerinde en düşük etkiye sahip olduğu belirlenen 4 bobin ölçüm noktası (Bobin 2, 5, 6 ve 7) ve bunlara ait gecikmeler modelden tamamen elenerek toplam öznetelik sayısı 19'u içeren daha sade bir mimariye düşürülmüştür.
- **Optimize Model Başarısı:** Sadece en kritik 3 bobin ölçüm noktası (Bobin 1, 3 ve 4) ve bunların gecikme öznetelikleriyle yeniden eğitilen YSA modelinde, hazne çıkış tahmini için $R^2 = 0.9698$, separatör çıkış tahmini için ise $R^2 = 0.9568$ gibi oldukça yüksek başarı metrikleri korunmuştur. Fiziksel ölçüm noktalarının %57 oranında azaltılmasına rağmen tahmin hassasiyetinde anlamlı bir kayıp yaşanmamıştır.

KAYNAKÇA

- Akyol, U., (2007). Theoretical investigation for drying of yarn bobbins, Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences, PhD, edirne, Türkiye.
- Buluş, H.N., Moralar, A. ve Çelen, S. (2023). Modeling the Moisture Content and Drying Rate of Zucchini (Cucurbita pepo L.) in a Solar Hybrid Dryer Using ANN and ANFIS Methods, PHILIPP AGRIC SCIENTIST, 106(3), 293-305.
- Buluş, H.N. (2024). Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System and Artificial Neural Network Models for Predicting Time-Dependent Moisture Levels in Hazelnut Shells (Corylus avellana L.) and Prina (Oleae europaeae L.), Processes, 12(8), 1703. <https://doi.org/10.3390/pr12081703>.
- Buluş, H.N., Akyol, U., Subaşı, N. ve Çelen, S. (2024). Prediction of the internal temperatures of the yarn bobbin during, Drying, Iksad publishing, Ed: Bellitürk, K., 243-267.
- Bulus , H. N. ., ve Celen , S. . (2025). Prediction of Moisture Content in Kiwi (Actinidia deliciosa) Dried Using Machine Learning Approaches. *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*, 9(1), 74–88. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14564833>
- Durak, A. (2012). Modeling of a convective drying process by using artificial neural networks method, MsC. Thesis, Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye.
- Karakoca, A. (2017). Determination of temperature field for drying process of yarn bobbins using finite difference method, MsC. Thesis, Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye.
- Levent, M., Buluş, H. N., Çelen, S. ve Moralar, A. (2023). Comparison of Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic Methods in the Hazelnut Shell Drying Process. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 6(2), 50-55.
- Moralars, A. (2024). Modeling drying process parameters for petroleum drilling sludge with ANN and ANFIS, *Processes*, 12(9), 1948. <https://doi.org/10.3390/pr12091948>.
- Mousavifard, SM., Attar, M.M., Ghanbari, A. ve Dadgar, M. (2015) Application of artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy

inference system to investigate corrosion rate of zirconium-based nano-ceramic layer on galvanized steel in 3.5% NaCl solution. J Alloys Compd. 639, 315–324.

Toraman, S. (2011). Experimental investigation of drying behavior of wool bobbins, MsC. Thesis, Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye.

BÖLÜM 6

MADENLERDEKİ PATLATMA UYGULAMALARINDA USBM 8 MİLİSANİYE GECİKME KURALI ÜZERİNE BİR DEĞERLENDİRME

Dr. Öğr. Üyesi Zekeriya DURAN¹

Prof. Dr. Bülent ERDEM²

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.21208758>

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Teknik Bilimler MYO, Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Sivas, Türkiye. zduran@cumhuriyet.edu.tr, orcid id: 0000-0002-9327-8567

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye. bulent@cumhuriyet.edu.tr, orcid id: 0000-0002-1226-9248

1. GİRİŞ

Amerika Birleşik Devletleri Maden Bürosu (USBM) tarafından RI 8507 kodu ile yayımlanan bir araştırma raporunda (Siskind vd., 1980) ortaya konan bulgular, daha sonra yasa koyucu tarafından 30 CFR Bölüm 816/817 kapsamında yasal düzenlemeye dahil edilmiştir. Bu düzenleyici çerçeveye, maden patlatma uygulamalarında ölçekli mesafe hesaplamalarında eş zamanlı patlamanın varsayıldığı eşik olarak günümüzde yaygın şekilde kullanılan 8 milisaniyelik (ms) delikler arası gecikme ölçütü getirilmiştir. Ancak günümüzde, modern sayısal sismograflar, yüksek frekanslı üç eksenli ivmeölçerler, hesaplamalı dalga formu modellemesi ve milisaniye altı zamanlama doğruluğuna sahip elektronik kapsüllerin yaygın kullanımı, 8 ms eşığının demode ve bağlamından kopuk olduğunu göstermektedir. Güncel araştırmalar; baskın frekans içeriği, dalga yayılma hızı ve bölgeye özgü jeolojiye bağlı olarak, 8 ms'yi çok aşan gecikme aralıklarında yapıcı örtüşmenin oluşabileceğini göstermektedir. Bu bölümde, bu kuralın bilimsel temeli, tarihsel süreci ve günümüz koşulları altında teknik anlamda geçerliliği; patlama kaynaklı titreşim sismolojisi, dalga formu örtüşme mekaniği, sayısal elektronik kapsül (detonator) uygulamaları ve uluslararası yasal düzenlemeleri karşılaştıran araştırmalar üzerinden derlenmiştir. Sonuç olarak, 8 ms'lik zaman zarfı kuralının sağlam ve kanıta dayalı bir standart mı yoksa izleme ve modelleme teknolojisindeki gelişmelerle görgül temelleri zayıflamış, muhafazakâr bir sezgisel yöntem mi olduğuna dair bir değerlendirme yapılmıştır.

Bu bölümde Avustralya, Güney Afrika, Kanada, Avrupa ve Kuzey Amerika'da yapılan araştırmalardan elde edilen bulgular sentezlenmiş, imza deliği analizi ve dalga formu kestirim modellemesinin katkıları tartışılmıştır. Ayrıca, yasal mevzuat ve mühendislik uygulamalarında 8 ms kuralının korunması veya değiştirilmesi ile sahaya özgü frekansa dayalı ölçütlerin getirilmesi değerlendirilmiştir.

Patlatma kaynaklı titreşim kontrolü, madenlerde ve taş ocaklarında yapılan patlatmaların en önemli yönlerinden biridir. Zemin titreşimleri, kaya tabakaları ve zeminde sismik dalgalar olarak yayılır; yakındaki yerleşim yerlerinde yapısal hasara, insanlarda rahatsızlık hissine ve kötü tasarlanmış patlatma uygulamalarında şevlerde veya yeraltı açıklıklarında birikimli zayıflamaya yol açabilir. Siskind vd.'nin (1980) USBM raporu RI 8507'nin

yayımlanmasından bu yana, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve ardından birçok ülkede ilgili yasal mevzuat ve patlatma uygulamaları yalnızca 8 ms zaman zarfı eşğine dayandırılmıştır. Bu zarf, ölçekli mesafe formülleriyle tepe parçacık hızının (PPV) kestirilmesi amacıyla, iki patlamanın bağımsız olaylar olarak kabul edilmesi için gereken minimum delikler arası gecikme süresidir.

Bu kuralın pratik sonuçlarına göre: (1) Birbirlerine göre 8 ms içinde ateşlenen tüm delikler eş zamanlı kabul edilir ve ölçekli mesafe hesabında delik şarjlarının toplamı kullanılır; (2) 8 ms'den daha uzun aralıklarla ateşlenen delikler ise bağımsız olaylar olarak değerlendirilir ve ilgili hesapta yalnızca tek delik şarj miktarı dikkate alınır. Maksimum anlık şarj (Maximum Instantaneous Charge - MIC), yasal mevzuatta izin verilen en yüksek PPV sınırını aşmadan kullanılabilecek MIC miktarını belirlediği için önemli ekonomik ve operasyonel öneme sahiptir.

Kuzey Amerika, Avustralya ve bazı Avrupa ülkelerinde yaygın olarak yasal kabul görmesine rağmen, 8 ms kuralı bilim camiasından sürekli ve giderek artan niceliksel eleştiriler almıştır. Bu değer, 1970'lerin kapsül saçılım toleransları ve sismograf örnekleme hızlarına göre kalibre edildiği ve dalga yapısı örtüşmesinin fiziksel teorisiyle yetersiz bir ilişkiye sahip olduğu öne sürülmektedir. Destekleyen görüşlere göre ise kural, yasal düzeyde sistematik bir yetersiz tahmin kanıtı olmaksızın kırk yılı aşkın süredir pratik ve muhafazakâr biçimde koruyucu işlevini yerine getirerek emniyet sağlamaktadır.

2. YASAL DÜZENLEMENİN TARİHSEL GELİŞİMİ: USBM RAPORU RI 8507 VE FEDERAL YÖNETMELİK: 30 CFR PART 816/817

ABD'de patlatma kaynaklı zemin titreşimine ilişkin temel düzenleme, 1980 yılında ABD Maden Bürosu tarafından yayımlanan RI 8507, 'Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting' adlı araştırma raporudur (Siskind vd., 1980). Bu önemli çalışmada, 26 eyaletteki yerüstü madenlerinde yapılan patlatmalardan elde edilen sismograf kayıtları derlenmiş, zemin titreşim seviyeleri gözlemlenen yapısal hasarla ilişkilendirilmiş ve PPV'nin ölçekli mesafe tahmini için görgül bir temel oluşturulmuştur.

RI 8507 raporu ile 1980 yılından günümüze ABD mevzuatını tanımlayan iki temel nicel çerçeve oluşturulmuştur. Birincisi, frekansa göre ayrılmış PPV hasar ölçütleri tanıtılmıştır. Buna göre, konutlar düşük frekanslı titreşimlere ($\sim < 40$ Hz) daha duyarlı olduğundan, yüksek frekanslı titreşimlere göre daha düşük PPV eşik değerleri gerektirir. İkincisi, MIC kavramı ve birden fazla deliğin eş zamanlı patlatılmasının PPV tahminlerinde hesaba katılması gereken etkili şarj kütlelerini artırdığı önermesidir. Raporda, incelenen koşullar için tek delikli patlamada baskın dalga formu süresinin yaklaşık 8-12 ms olduğu gözlemine dayanarak, birbirinden 8 ms içinde ateşlenen deliklerin eş zamanlı olarak değerlendirilmesi gerektiği önerilmiştir.

RI 8507'deki 8 ms ölçütü, öncelikle piroteknik gecikmeli kapsül saçılımının dikkate alınmasından türetilmiştir. 1970'lerde mevcut olan elektrikli gecikmeli ateşleyicilerin anma zamanlama doğruluğu, nominal aralığın $\pm\%5-10$ 'u kadardı; bu da nominal olarak 8 ms ile ayrılmış iki deliğin ölçüm belirsizliği içinde potansiyel olarak aynı anda ateşlenebileceği anlamına geliyordu. Bu nedenle kural, ateşleyici zamanlama hatası nedeniyle istenmeyen eşzamanlı patlamaya karşı bir güvenlik payı içeriyordu.

USBM araştırma programının ardından, Yerüstü Madencilik Reklamasyon ve Uygulama Ofisi (Office of Surface Mining and Reclamation – OSMRE), patlatma titreşimi standartlarını federal yönetmeliğe aktarmıştır. Bu düzenleme ile atım mesafesi ve yapı tipine bağlı olarak en yüksek PPV eşığı belirlenmiş, MIC'in 8 ms eşzamanlılık kuralı ile hesaplanması zorunlu kılınmıştır. Düzenlemede, gecikme başına şarj kütlelerinin belirlenmesi amacıyla, 8 ms içinde meydana gelen ateşlemelerin eşzamanlı kabul edileceği açıkça ifade edilmiştir. 30 CFR standardı, birçok ABD eyaletinde doğrudan benimsenmiş veya benzer hükümler oluşturulmuştur. Eleştirilerin başlıca hedefi, düzenlemelerin 8 ms ölçütünün yerel koşullara göre değiştirilmesi için herhangi bir mekanizma sunmaması ve bunun sabit, evrensel bir eşik olarak kabul edilmesidir.

USBM RI 8507 ile elde edilen bulgular, diğer ülkelerdeki ilgili yasal mevzuatı da etkilemiştir. Bunlar arasında Avustralya'nın Queensland eyaletindeki Maden ve Enerji Bakanlığı ile Yeni Güney Galler Çevre Koruma Kurumu'nun 1980'ler ve 1990'lardaki patlatma kaynaklı titreşim standartları; Güney Afrika Maden Odası araştırma programı ile geliştirilen SANS 2Gap prosedürleri; Kanada'nın Alberta, Ontario ve Britanya Kolombiyası

eyaletlerindeki düzenlemeler bulunmaktadır. Alman ve Avusturya DIN/ÖNORM standartları bağımsız olarak geliştirilmiş ve 8 ms'lik özel ölçüt benimsenmemiş olsa da, genel olarak karşılaştırılabilir PPV eşik seviyelerine ulaşılmıştır.

Patlatma mühendisliğinde referans kabul edilen Uluslararası Patlayıcı Mühendisleri Derneği (ISEE) tarafından periyodik olarak güncellenip yayımlanan Blasters' Handbook, bu konuda ihtiyatlı bir belirsizliğe işaret ederek 8 ms kuralını yerleşik bir standart olarak sunmakta, ancak patlayıcı teknolojisi ve sismograf yeterliliklerindeki gelişmelerin yeniden incelenmesini gerektirebileceğini de belirtmektedir.

3. PATLATMA DALGASI ÖRTÜŞME FİZİĞİ

3.1. Patlatma Kaynaklı Sismik Dalga Yayılımı

Bir patlatma deliğindeki patlayıcı infilak ettiğinde karmaşık bir dalga alanı oluşur ve enerji salınımı gerçekleşir. Öncelikle kaya kütesinde gerilim dalgasına dönüşen yakın alan şok dalgası ortaya çıkar. Ardından kaya tipine bağlı olarak 1500-6000 m/s hızında yayılan basınç dalgaları (P dalgası) oluşur. P dalgası, zeminde en hızlı yayılan dalga türüdür ve parçacıklar dalganın yayılma yönüyle aynı doğrultuda ileri-geri hareket eder. Daha sonra P dalgası hızının yaklaşık %50-60'ı kadar bir hızla yayılan kesme dalgaları (S dalgası) meydana gelir. Bu dalgalarda parçacıklar, dalganın yayılma yönüne dik açıyla titreşir. P ve S dalgaları, kayaların içinde üç boyutlu olarak ilerledikleri için gövde dalgaları olarak adlandırılır. Daha büyük mesafelerde ise Rayleigh yüzey dalgaları baskın hale gelir. Bu dalgalar P ve S dalgalarına göre daha yavaş hareket eder, derinlikle birlikte hızla zayıflar ve esas olarak yapısal titreşim hasarından sorumludur. Rayleigh dalgasında parçacıklar dikey düzlemde eliptik bir hareket yapar; yüzeydeki parçacıkların hareketi ise dalganın ilerleme yönüne ters yöndedir (Richards ve Moore, 2005). Bu dalga tipleri arasındaki enerji dağılımı ve zeminde ortaya çıkan hareketin frekans içeriği, patlayıcı tipine, sınırlanma durumuna, kaya özelliklerine ve geometrik faktörlere bağlıdır.

Patlatma alanına 50-1000 m mesafedeki konutlarda oluşabilecek hasarın tahminiyle ilgili olarak, tek delikli bir patlatmadan elde edilen titreşim kaydı genellikle 50-200 ms süren, baskın frekansları 5-100 Hz aralığında olan ve zirvesi varıştan sonraki ilk 30-80 ms içinde meydana gelen bir dalga dizisi

oluşturur. Bu zamansal yapı şu açıdan önemlidir: İki delik yakın zamanlarda patlatılırsa, dalga dizileri herhangi bir gözlem noktasında üst üste binecek ve bunun derecesi, yapıcı veya yıkıcı olarak, örtüşme anındaki iki dalga biçiminin göreceli fazlarına bağlı olacaktır.

Dalga örtüşmesi, doğrusal örtüşme ilkesiyle yönetilir; herhangi bir noktadaki yer değiştirme veya hız, her bir dalga yer değiştirmesinin aritmetik toplamıdır. İki dalga, tepe noktaları hizalanarak aynı fazda bir noktaya ulaştığında, ortaya çıkan genlik bireysel genliklerin toplamına eşittir. Bu yapıcı girişim (constructive superpositioning), teorik olarak tek delikli bir olaya göre PPV'yi iki katına çıkarabilir. Dalgalar faz dışı olduğunda, birinin tepe noktası diğzerinin çukuruyla hizalandığında, oluşan yıkıcı girişim (destructive interference) genliği azaltır. Titreşim etkisi, ideal durumda, eşit genlikli ve mükemmel zıt fazlı dalgaların örtüşmesiyle potansiyel olarak sıfıra indirilebilir.

Birbirinden T gecikme aralığıyla ayrılmış iki dalga dizisi arasında yapıcı girişim oluşabilmesi için, T'nin baskın dalga periyodunun ($1/f$, burada f baskın frekanstır) tamsayı katı olması gerekir. $T = 8$ ms için, baskın frekans 125 Hz, 62,5 Hz, 31,25 Hz gibi değerlerde yapıcı girişim oluşur. Tipik açık ocak patlatmalarında, 10-50 Hz aralığında baskın frekanslar yaygındır; bu da gerçekçi koşullarda 8 ms gecikmelerden kaynaklanan yapıcı girişimin mümkün olduğu anlamına gelir. Bu durum, ABD ve benzeri ülkelerdeki 8 ms gecikme zarfı varsayımına temel bir zorluk oluşturur.

3.2. 'Gecikme Oranı' Kavramı ve Kritik Gecikme

Blair ve Minchinton (1997, 2006), gecikme aralıklarının yalnızca sabit bir mühendislik kuralı olarak değil, baskın dalga formu periyodu ile ilişkilendirilerek analiz edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Buna göre, herhangi bir saha ve patlama geometrisinde, yapıcı girişimin maksimuma ulaştığı bir 'kritik gecikme' bulunur ve bu kritik gecikme, sabit bir süre yerine karakteristik dalga formu periyodunun bir fonksiyonudur. Avustralya'daki taş ocakları ve kömür madenlerinde yapılan kapsamlı saha ölçümleriyle doğrulanan bu analitik çerçeve, kritik gecikmenin sahaya özgü baskın frekansa bağlı olarak 5 ms ile 40 ms arasında değişebildiğini göstermiştir. Daha da önemlisi, yapılan çalışma, 8 ms'den daha kısa veya daha uzun gecikmelerin, bölgeye özgü baskın frekansa bağlı olarak yapıcı örtüşmeye yol açabileceğini göstermiştir. Bu nedenle, titreşimin büyümesini önlemek için evrensel bir ölçüt olarak tek tip 8 ms eşiği

yetersizdir; yüksek frekanslı bölgelerde aşırı koruyucu, düşük frekanslı bölgelerde ise yetersiz kalabilir. Blair (2009), patlatma tasarımlarında gecikme süresi ve doğruluğunun, titreşimin frekans içeriğini yalnızca sınırlı bir mesafe aralığında kontrol etmek için kullanılabileceğini belirtmiştir. Patlatma titreşim frekansının yayılma ve zayıflama yasalarında bazı ilerlemeler kaydedilmiş olsa da, bu ilerlemeler PPV'deki büyük araştırma başarılarıyla karşılaştırıldığında hâlâ çok azdır. Bu nedenle, patlama kaynaklı titreşimin frekans karakteristiklerinin ve mekanizmasının incelenmesi gerektiğini ifade etmiştir.

3.3. Dalga Formu Karmaşıklığı ve Gerçekçi Örtüşme

Gerçek patlatma titreşimi dalga formları, basit sinüzoidal yapıda değildir; zaman içinde değişen frekans içeriğine sahip, geniş bantlı ve karmaşık sinyallerdir. Gerçekçi dalga formlarının örtüşmesi yalnızca tek bir baskın frekansı değil, dalga dizisinin tüm güç spektral yoğunluğunu dikkate almayı gerektirir. Richards ve Moore (2007), Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transformation – FFT) analiziyle yüzey patlatmalarında 100-500 m mesafede titreşim enerjisinin tipik olarak 5-200 Hz arasında yayıldığını ve hasar oluşturan enerjinin büyük bölümünün 10-40 Hz bandında yoğunlaştığını göstermiştir. Bu gözlem, imza deliği analizi ve doğrusal örtüşme modeli geliştirme çalışmalarının temel motivasyonunu oluşturmuştur. Bu spektral karmaşıklık, herhangi bir gerçekçi gecikme aralığında birleşik dalga formunun bazı frekanslarda kısmi yapıcı, diğerlerinde kısmi yıkıcı girişim göstereceği anlamına gelir. PPV üzerindeki net etki, tepe hızını belirleyen baskın spektral bileşene bağlıdır. Bu gözlem, 8 ms kuralının öne sürdüğü aynı/farklı yaklaşımına daha titiz bir alternatif olarak doğrusal örtüşme modellerinin (LSM) geliştirilmesine öncülük etmiştir.

4. GÖRGÜL KANITLAR: 8 MS ÖLÇÜTÜNÜN SINANMASI

4.1. 8 ms Eşiğini Destekleyen Temel Çalışmalar

8 ms ölçütü, esas olarak 1970'lerde USBM tarafından yürütülen aletli patlatma seferberliğine dayanıyordu. Bu saha çalışmalarında saniyede yaklaşık 1000 örnekleme hızına (1 kHz) sahip analog sismograflar kullanılmış ve kaydedilen dalga biçimlerinin zamansal çözünürlüğü yaklaşık 1 ms ile sınırlanmıştı. Bu kısıtlamalar altında, gecikmeli ateşleme uygulanan

deliklerden gelen dalga formu zarfları 8 ms ile ayrıldığında etkileşimin azaldığı gözlemlenmiştir.

Dowding (1985), patlama titreşimine yapısal tepkiyi incelemeye çalışmasında, 8 ms eşiğinin belirli delik aralığına, patlayıcı madde kütlesine ve çalışma alanlarının jeolojisine göre kalibre edildiğini ve evrensel olarak geçerli olmayabileceğini belirtmiş, ancak USBM çerçevesini genel olarak desteklemiştir. Bu tespit, sonraki mevzuat düzenlemelerinde büyük ölçüde göz ardı edilmiştir. ABD'de 1993 yılında getirilen yapısal hasar kriterlerine ilişkin güncellemede (USBM RI 9455) (Siskind vd., 1993), 8 ms kuralı fiziksel temeli esaslı şekilde yeniden incelenmeden güçlendirilmiştir.

4.2. Aksi Yöndeki Çalışmalar

Literatür araştırmalarında, patlatma tasarımlarında uzun süredir kullanılan 8 ms'lik gecikme ölçütünün sorgulandığı görülmektedir. Bununla bağlantılı olarak, dalga yayılım sürelerinin belirlenmesinde ölçekli mesafe hesabında kullanılan anlık şarj miktarının 8 ms aralığına göre belirlenmesinin fiziksel olarak anlamlı olmadığı belirtilmiştir. Bunun temel nedeni, patlatma sonucu oluşan titreşim dalgalarının süresinin 8 ms'den çok daha uzun olması ve bu nedenle bu aralıktaki dalgaların birbirine eklenmesini engelleyememesidir. Tarihsel olarak, 1960'larda USBM tarafından yürütülen araştırmalarda 9 ms gecikmenin titreşimi azalttığı gözlenmiş, ± 1 ms hata payı nedeniyle 8 ms ölçütü önerilmiş ve mevzuata eklenmiştir. Ayrıca, yapılan çalışmada 8 ms kuralının yalnızca tek sıra atımlar için geçerli olduğu, ancak günümüzde sıklıkla çok sıralı atımların kullanılması nedeniyle bu kuralın önemini yitirmesi gerektiği belirtilmiştir. Ek olarak, 8 ms kuralının patlatmaların esnek biçimde tasarlanmasını engellediği, üretkenliği düşürdüğü ve titreşim kontrolünde etkisiz kaldığı ifade edilmiştir. 8 ms kuralı yerine, yıkıcı girişim yöntemleriyle dalga tepeleri ve çukurların çakıştırılması sayesinde titreşimlerin azaltılabileceği ve daha uzun gecikmelerle (örneğin 25-60 ms) PPV değerlerinin düşürülebileceği belirtilmiştir. Çalışmanın sonuç bölümünde, yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı 8 ms ölçütünün yalnızca başka bir veri bulunmaması durumunda muhafazakâr bir üst sınır olarak kullanılabileceği, ancak modern patlatma tasarımlarında jeolojik koşullara özgü gecikme sürelerinin ve bilimsel analizlere dayalı yöntemlerin tercih edilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Anderson, 1989).

Maden işletmelerinin yakınında yerleşim alanlarının bulunması, patlatma işlemlerinden kaynaklanabilecek titreşimlerin kontrolünü kritik hale getirir. Patlatma tasarımlarının, yerleşim yerlerinde oluşabilecek titreşimleri en aza indirecek şekilde yapılması büyük önem taşır. Bu nedenle, patlatma tasarımlarında, yerleşim yerlerindeki yapıların ulusal ve uluslararası titreşim eşik düzeylerine ulaşmamasını sağlamak için patlatma delikleri arasındaki gecikme aralığının seçimi son derece önemlidir. Yapılan çalışmada, titreşim enerjisini azaltmanın tek yolunun 10-35 ms aralığında bir gecikme aralığı kullanmak olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, patlatma sonrası ortaya çıkan titreşimlerin, gecikme başlatıcılarının doğruluğunun yanı sıra, her bir patlatma deliği sinyali arasındaki rastgele dalgalanma düzeyine de bağlı olduğu ifade edilmiştir. Yapılar üzerindeki titreşim düzeylerini kontrol etmek için patlatma deliklerinin gecikme aralığını belirlemenin en etkili yolunun çok hassas elektronik gecikme cihazlarıyla mümkün olduğu belirtilmiştir. Her bir patlatma deliğinden kaynaklanan titreşim salınımı, diğer herhangi bir patlatma deliğiyle yüksek korelasyon göstermiyorsa, patlamanın ortaya çıkan genlik spektrumu tamamen öngörülemez olur. Bu durum, gecikme başlatma dizisi veya doğruluğundan bağımsız olarak ortaya çıkar. Bu koşullarda, yapısal tepki bandı içinde yer alan patlamadan kaynaklanan enerjiyi tahmin etmek imkânsızdır (Blair, 1993).

Yapılan bir diğer çalışmada, patlatma tasarımlarında yaygın olarak kullanılan 8 ms gecikme kuralının bilimsel geçerliliği sorgulanmıştır. 8 ms kuralının yüksek frekanslı titreşim ortamlarında sınırlı fayda sağlayabileceği, ancak düşük frekanslı patlatmalarda keyfi ve hatalı sonuçlar doğurabileceği belirtilmiştir. Özellikle, 8 ms kuralının hava şoku (airblast) kontrolü için tasarlanmadığı ve yanlış uygulandığında beklenenden çok daha yüksek zemin titreşimi ile hava şoku seviyelerine yol açabileceği ifade edilmiştir. Çalışmada ayrıca, dalga cephelerinin örtüşmesi, delik düzeni ve gecikme dizisinin birleşik etkilerinin titreşimleri artırabileceği gösterilmiştir. Bu nedenle, her patlatma sahası için saha koşullarına özgü gecikme aralığı belirlenmesi ve tasarımın ölçümle doğrulanması gerektiği vurgulanmıştır. Patlatma tasarımlarında tek tip 8 ms kuralına güvenmek yerine, jeolojik özelliklere ve titreşim davranışına uygun bilimsel gecikme tasarımları geliştirilmesi gerektiği de belirtilmiştir (Moore ve Richards, 2002).

Richards ve Moore (2003), yerüstü patlatma tasarımlarında uzun yıllardır standart uygulama olarak kabul edilen "8 ms içinde ateşlenen maksimum patlayıcı miktarı" yaklaşımının güçlü bir fiziksel temele dayanmadığını ileri sürmüşlerdir. Ayrıca, zemin titreşimlerinin yalnızca belirli bir zaman diliminde ateşlenen anlık yük miktarıyla açıklanamayacağını, titreşim seviyelerinin kaya ortamının özellikleri, dalga yayılımı, baskın frekanslar, gecikme dizilimi ve dalga örtüşmesi gibi birçok faktörden etkilendiğini göstermişlerdir. Çeşitli saha örnekleriyle yaptıkları değerlendirmelerde, 8 ms ölçütüne uyan bazı patlatmalarda yüksek titreşimler oluşurken, kurala uymayan bazı durumlarda ise daha düşük titreşimler ölçülebildiğini belirtmişlerdir. Bu bulgular doğrultusunda, 8 ms ölçütünün evrensel bir titreşim kontrol ölçütü olarak kabul edilmemesi, bunun yerine sahaya özgü ölçümlere ve frekans analizlerine dayalı mühendislik yaklaşımlarının kullanılmasını savunmuşlardır.

Patlatmalarda yaygın olarak kullanılan 8 ms zaman aralığının bilimsel olarak genellenebilir bir tasarım ölçütü olmadığı vurgulanmıştır. 8 ms kuralının, eski tip gecikme kapsüllerindeki ateşleme zamanlamasını kontrol etmek amacıyla geliştirilen pratik bir yaklaşım olduğu, ancak günümüzde kaya mekaniği ve dalga yayılımındaki teknolojik gelişmeleri dikkate almayan evrensel bir standart gibi kullanıldığı belirtilmiştir. Patlatmalarda zemin titreşimlerinin yalnızca iki delik arasındaki gecikme süresine bağlı olamayacağı; kaya kütlelerinin elastik özellikleri, sismik dalga yayılım hızı, patlatma geometrisi, patlatma sırası ve dalgaların örtüşmesi gibi birçok faktör tarafından belirlendiği ifade edilmiştir. Bu nedenle, patlatmalarda 8 ms'den daha uzun aralıklarla ateşlemenin her zaman titreşimlerin bağımsız olacağı anlamına gelmeyeceği, bazı durumlarda daha büyük gecikmelere rağmen dalga çakışması nedeniyle yüksek genlikli titreşimlerin oluşabileceği belirtilmiştir. Buna karşılık, 8 ms aralığına uyulmayan bazı tasarımlarda ise uygun ateşleme sıralaması ve gecikme optimizasyonu sayesinde daha düşük titreşim seviyeleri elde edilebileceği, bu kuralın hava şoku kontrolüyle doğrudan ilişkili olmadığı ve bu amaçla kullanılmasının teknik olarak yanıltıcı olduğu da ifade edilmiştir. Bu nedenle, patlatma tasarımlarında sabit bir zaman kuralı yerine, sahaya özgü sismik veri analizi, frekans içeriği değerlendirmesi ve modern elektronik kapsül teknolojisinin sunduğu hassas gecikme kontrolüyle optimize edilmiş fizik temelli bir yaklaşımın benimsenmesi gerektiği savunulmuştur (Reisz vd., 2006).

Shi ve Chen (2011), patlatma kaynaklı zemin titreşiminin patlatmalı açık ocak madenlerinde temel çevresel sorunlardan biri olduğunu ve aşırı titreşim düzeyinin hem açık ocak nihai basamak şev duraylılığını hem de yakındaki yerleşim yerlerindeki yapı ve tesislere zarar verebileceğini belirtmiştir. Bu nedenle, açık ocak madenlerinde patlatma kaynaklı zemin titreşiminin olumsuz etkilerinin giderilmesi için titreşimin nasıl kontrol edileceğinin incelenmesinin çok önemli olduğunu vurgulamışlardır. Bu amaçla, patlatma kaynaklı zemin titreşimlerinin yayılım düzeylerinin ve olası etkilerinin azaltılmasına yönelik olarak açık ocak demir madeni sahasında bir dizi çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, 66 patlatma uygulamasının parametrelerini incelemişlerdir. Patlatma sırasında ölçülen verilerin istatistiksel analizinde kullanılmak üzere, PPV ile ölçekli mesafe (scaled distance – SD) arasında bir ilişki kurmak için USBM tarafından önerilen tahmin denklemlerini kullanmışlardır. Maden sahası için PPV ve SD arasındaki ilişkiyi belirleyip kullanılmasını önermişlerdir. Patlatma uygulamalarında titreşim düzeyini düşürmek için gecikme başına maksimum şarj miktarını hesaplamışlardır. Ölçüm sonuçlarına göre, maden sahasında kullanılması önerilen gecikme başına maksimum şarj miktarını 15 ms'lik gecikme aralığına göre belirleyip, zemin titreşim düzeyinde %24,5 oranında azalma elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

Lee ve Choi (2014), yaptıkları çalışmada yedi farklı gecikme süresi kullanarak gecikme süresinin zemin titreşimine etkilerini araştırmıştır. Her gecikme süresi için üç patlatma olmak üzere toplam 21 patlatmada ölçüm yapmış, mesafeye bağlı bir titreşim tahmin denklemi geliştirerek ölçülen titreşim hızı ve frekans değerlerini Langefors Gecikme Teorisi kapsamında analiz etmiştir. Çalışma sonucunda, 8 ms ve 28 ms gecikme sürelerindeki ortalama titreşim hızlarının sırasıyla 5,76 cm/s ve 5,75 cm/s ile oldukça düşük olduğunu göstermiştir. Ayrıca, gecikme süresine bağlı olarak titreşim değerlerinde periyodik değişimler gözlemlemiştir. Öledükleri titreşim hızı ve frekanslarını Langefors Teorisi'ne uygulayarak maden sahası için en uygun gecikme aralıklarının 8 ms ve 24 ms olması gerektiğini belirtmiştir.

Sołtys (2018), yerüstü madenciligi patlatma uygulamalarında milisaniye gecikmeli tasarımların ve özellikle 8 ms ölçütünün ortaya çıkış nedenini ve günümüzdeki uygulamalardaki geçerliliğini incelemiştir. Zemin titreşim düzeyinde ms gecikmelerinin aralığı, hassasiyeti ve patlayıcı madde miktarının etkili olduğunu belirtmiştir. Çalışmasında, 8 ms kriterinin 1960'lı yıllarda

USBM tarafından geliştirilen patlatma titreşimi kontrol yaklaşımlarının bir sonucu olarak ortaya çıktığını ve bu kriterin aslında elektrikli kapsüllerde görülen gerçek ve ateşleme sürelerindeki anma zamanlama dağılımlarındaki belirsizlikten kaynaklandığını ifade etmiştir. Bu kapsüllerdeki gerçek ve ateşleme patlama zamanlarının anma değerlerinden sapması nedeniyle bazı gecikmelerin üst üste binerek beklenenden daha büyük anlık yükler oluşturabildiğini ve bu durumun titreşim analizlerinde güvenlik payının zorunlu hale gelmesine yol açtığını belirtmiştir. Modern elektronik kapsüllerin yüksek zaman hassasiyeti sayesinde, elektrikli kapsüllerdeki zamanlama belirsizliklerinin büyük ölçüde ortadan kalktığını ve dolayısıyla 8 ms ölçütünün artık teknik bir zorunluluk olmaktan çıkması gerektiğini vurgulamıştır. Bu nedenle, sabit 8 ms ölçütüne dayalı maksimum gecikme başına patlayıcı miktarı yaklaşımının patlatma uygulamalarında geçerli bir kural olmaması gerektiğini savunmuştur. Sonuç olarak, patlatma tasarımlarında ölçekli mesafe hesabında gecikme sürelerinin sabit bir değere göre hesaplanması yerine, kullanılan ateşleme sisteminin özelliklerine, saha koşullarına ve patlatma sahasının jeolojik özelliklerine göre optimize edilmesi gerektiğini belirtmiştir.

Sullivan (2023), birçok araştırmacı tarafından 60 yıldır kabul edilen 8 ms ölçütünün günümüz patlatma uygulamalarında kullanılmasının sorgulanması gerektiğini belirtmiştir. Çalışmasında, bir demir açık ocak işletmesinde anlık gecikme süresinin 8 ms olmayabileceğini vurgulamıştır. Patlatma tasarımlarında zemin titreşimi hesaplarında, her saha için optimum gecikme süresinin belirlenmesi gerektiğini ve buna bağlı olarak ateşleme sistemleri ile farklı jeolojik koşulların zemin titreşimine etkili olduğunu ifade etmiştir.

Farnfield vd. (2025), 8 ms kuralına dayalı veri ve teknikleri yeniden inceleyerek benzer yöntemleri farklı kaya türleri, mesafeler ve katsayılar için tek delikli titreşim kayıtlarından oluşan geniş bir veri tabanına uygulamış ve tipik patlatma tasarımlarındaki minimum aralıklarla karşılaştırarak hesaplanan takviyeler eklemiştir. 8 ms kuralının elektronik patlayıcılara uygulandığında bir ölçüde geçerli olduğu, ancak geleneksel şekilde uygulandığında geçerli olmadığı sonucuna varılmıştır.

4.3. 8 ms Kuralının Değiştirilmesini ya da Korunmasını Destekleyen Çalışmalar

Siskind ve Stagg (1985), 8 ms çerçeveli USBM yaklaşımını, kuralın baskın frekansın yüksek olduğu sahalarındaki koruyuculuğunun; patlayıcı madde kütlesi, delik aralığı ve jeolojik heterojenlik gibi patlatma tasarımındaki diğer belirsizlik kaynaklarına karşı bir güvenlik payı sağladığı gerekçesiyle savunmuştur. Görgül ölçekli mesafe veri tabanının, sahaya özgü analizler sapma gösterse bile, uygulamanın sürdürülmesi açısından sağlam bir düzenleyici olduğunu iddia etmişlerdir.

RI 8507 raporuna verileriyle katkıda bulunan Wiss ve Linehan (1978), 8 ms kuralının temel bir fiziksel yasa yerine 'pratik bir yaklaşım' olarak tasarlandığını açıkça belirtmiştir. Kuralın operasyonel faydası, kabul edilen fiziksel sınırlamalarıyla birlikte korunmasının nedeni olarak gösterilmiştir (Kopp ve Siskind, 1986).

Stachura vd. (1981), ABD'deki açık kömür madenlerinde kaydedilen patlatma verilerini analiz etmiş ve 8 ms kuralının, mekanik olarak hassas olmasa da, standart USBM ölçekli mesafe formülüyle kullanıldığında vakaların yaklaşık %80'inde tutucu PPV tahminleri ürettiğini, kalan %20'nin ise PPV eşik tasarımındaki genel güvenlik faktörü kapsamında yönetilebildiğini belirtmiştir. Başka bir çalışmada ise ölçekli mesafe hesabında USBM yaklaşımına atıfta bulunularak 8 ms kuralının kullanılması gerektiği bildirilmiştir (PennState, 2026).

İstanbul'daki Cendere bölgesindeki taş ocaklarında patlatmalardan kaynaklanan zemin titreşimlerinin çevresel etkilerini inceleyen çalışmada, şehirleşmenin taş ocaklarına yaklaşması nedeniyle patlatma kaynaklı zemin titreşimlerinin ciddi sorunlara yol açabileceği ve titreşimlerin kontrol edilebilecek parametrelerinin gecikme başına patlayıcı miktarı, gecikme süresi ve kapsül doğruluğu olduğu belirtilmiştir. Zemin titreşim değerlendirmesinde ABD OSMRE'nin geliştirdiği parçacık hızı sınırlaması, ölçekli mesafe denklemi, modifiye ölçekli mesafe ve patlatma seviye grafiği olmak üzere dört yöntem tanıtılmıştır. Özellikle ölçekli mesafe yaklaşımında, 8 ms veya daha büyük gecikmeler için patlayıcı miktarının sınırlandırılması vurgulanmıştır. 8 ms gecikme kuralı doğrudan tartışılmasa da, OSMRE'nin ölçekli mesafe yaklaşımında bu süre referans alınarak patlayıcı miktarı sınırlandırılmıştır (Kuzu ve Hüdaverdi, 2005).

Huang vd. (2019), kısa gecikmeli patlatma tasarımlarında gecikme süresinin patlatma kaynaklı zemin titreşimi üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Patlatma tasarımlarında, özellikle aynı anda ateşlenen deliklerin oluşturduğu titreşimlerle kısa gecikmeli patlatma uygulamalarının oluşturduğu titreşimleri karşılaştırarak gecikme sürelerinin titreşim kontrolündeki rolünü değerlendirmişlerdir. 0 ms (eşzamanlı ateşleme) ile 8 ms gecikmeli ateşleme uygulamalarını karşılaştırmış ve 8 ms gecikmenin titreşim dalgalarının örtüşmesini azaltarak PPV'yi düşürdüğünü göstermişlerdir. Kısa gecikmeli patlatma tasarımlarının, kaya parçalanmasını olumsuz etkilemeden titreşim enerjisinin zamana yayılmasını sağladığını ve böylece titreşim seviyelerinin azaltılmasına katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir. Değerlendirmelerini sayısal modelleme sonuçları ve saha ölçümleriyle destekleyerek gecikme süresinin titreşim dalgalarının girişim karakteristiğini önemli ölçüde değiştirdiğini ortaya koymuşlardır. Çalışmada, incelenen yeraltı madeni koşullarında yaklaşık 8-10 ms aralığındaki gecikmelerin hem kaya parçalanması performansını koruduğu hem de titreşim kontrolü açısından avantaj sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca, elde edilen sonuçların doğrudan tüm patlatma koşullarına genellenemeyeceğini, en uygun gecikme süresinin kaya kütlesi özellikleri, patlatma geometrisi ve saha koşullarına bağlı olarak değişebileceğini vurgulamışlardır.

Literatürde, patlatma kaynaklı zemin titreşim hesabında kullanılan ölçekli mesafe yaklaşımında, gecikme başına anlık şarj miktarı hesabında 8 ms ölçütünü destekleyen çalışmalar bulunmaktadır (Hustrulid, 1999; Şengün ve Gül, 2023).

5. ULUSLARARASI STANDARTLAR

Avustralya, ABD gibi ulusal düzeyde birleşik bir patlatma kaynaklı titreşim standardına sahip değildir; düzenleyici yetki eyalet ve bölge hükümetlerindedir. Ancak Avustralya ve Yeni Zelanda Çevre Konseyi (ANZEC), 'Technical Basis for Guidelines to Minimise Annoyance Due to Blasting' (1990) başlıklı ulusal ölçekte etkili bir çerçeve sunmuştur. ANZEC yönergeleri, USBM çerçevesine benzer PPV tabanlı ölçütler benimsemiş, ancak 8 ms kuralını evrensel bir eşzamanlılık ölçütü olarak göstermek yerine, patlatma tasarımcılarının sahaya özgü dalga formu özelliklerini örtük olarak

dikkate aldığı 'patlatma izleme ve analiz' yaklaşımlarıyla titreşim uyumluluğunu göstermelerini önermiştir.

Güney Afrika'da CSIR Madencilik Teknolojisi (The Council for Scientific and Industrial Research) tarafından geliştirilen patlatma titreşimi standartlarında (Güney Afrika Ulusal Standardı SANS 2Gap), USBM 8 ms kuralı yerine, yapısal tepkinin frekansa bağlılığını doğrudan dikkate alan frekans ağırlıklı tepe parçacık hızı (ppv_f) ölçütleri kullanılmaktadır. ISO 4866'ya (Mekanik Titreşim ve Şok - Sabit Yapıların Titreşimi) temel oluşturan bu yaklaşım, USBM çerçevesine göre fiziksel olarak daha tartışmasız ve titizdir.

Stacey ve Wesseloo (1998) ile Milev vd. (2002) tarafından Güney Afrika'daki madenlerde yapılan araştırmalarda, derin yeraltı ortamlarında patlatma kaynaklı titreşim özelliklerinin yerüstü patlatma koşullarından temel olarak farklı olduğu, baskın frekansların genellikle daha yüksek (50-200 Hz) olduğu ve dalga dizisindeki zayıflamanın geometrik yayılmadan çok saçılma ile kontrol edildiği belirlenmiştir. Bu bulgular, farklı madencilik ortamlarında tek bir 8 ms eşiğinin yeterli olmadığını göstermektedir.

Alman ve Avusturya titreşim standartları (DIN 4150-3 ve ÖNORM S 9020), modern sismik uygulamalarla büyük ölçüde uyumlu, frekansa göre farklılaştırılmış hız tabanlı bir yaklaşım benimser (Adam vd., 2011). Her iki standartta 8 ms kuralı uygulanmaz; bunun yerine patlama titreşiminin frekans analizi zorunludur ve frekansa göre değişen PPV sınırları uygulanır. Bu standartlar, tutarlı yapısal koruma açısından sabit eşik kurallara göre daha üstün bir yaklaşım sunar.

Kanada'da patlatma kaynaklı titreşim mevzuatı, eyalet yetki alanları arasında parçalıdır. British Columbia Maden Yasası kapsamındaki izinler ve ilgili kılavuzlar genellikle USBM ölçekli mesafe yaklaşımını (8 ms kuralı dahil) benimserken, Ontario Madenlerde Sağlık ve Güvenlik Yasası ile ilgili düzenlemeler, belirli bir eşzamanlılık ölçütü olmaksızın sahaya özgü titreşim izlemeyi zorunlu kılar.

Patlatma kaynaklı titreşim izleme yöntemlerinin ülkeler arasındaki karşılaştırmalı özeti Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: Ülkelere göre patlatma kaynaklı titreşim izleme yöntemi

Ülke/Bölge	Standart	Eş zamanlılık ölçütü	Frekans analizi	Durum
ABD	30 CFR 816/817	8 ms eşiği (sabit)	Hayır	Reçeteli, 1983'ten beri değişmedi
Avustralya (NSW)	NSW Planlama Kılavuzu	İmza deliği analizi (önerilen)	Evet (500 m için)	Performans tabanlı
Avustralya (QLD)	Patlayıcılar Yasası TNGs	Frekansa bağlı gecikme	Evet	İlerici, uyarlanabilir
Güney Afrika	SANS 2Gap / CSIR	Sabit ms kuralı yok; ppvf	Evet (zorunlu)	Frekans ağırlıklı
Almanya	DIN 4150-3	Sabit ms kuralı yok	Evet (zorunlu)	Frekans ağırlıklı
Avusturya	ÖNORM S 9020	Sabit ms kuralı yok	Evet	Frekans ağırlıklı
Kanada (BC)	BC Maden Yasası	8 ms (USBM'yi takip eder)	Hayır	ABD'ye benzer
Kanada (ON)	Ontario Maden Yasası	Sabit ms kuralı yok	Evet (sahaya özgü)	Performans tabanlı
İngiltere	BS 7385 / PPG2	Belirli ms kuralı yok	Evet	Kılavuz tabanlı
İsveç	SS 025211	Sabit ms kuralı yok	Evet	Frekans ağırlıklı

6. ELEKTRONİK KAPSÜL TEKNOLOJİSİ ve DÜZENLEYİCİ SONUÇLARI

8 ms kuralının sıklıkla yeterince vurgulanmayan yönlerinden biri, kökeninin piroteknik gecikmeli kapsüllerin mekanik sınırlamalarında yatmasıdır. USBM araştırmaları 1970'lerde yürütülürken, baskın ateşleme teknolojisi piroteknik gecikme elemanlarına dayalı elektrikli gecikmeli kapsüllerdi. Bu aygıtların anma zamanlama dağılımı, gecikme aralığının $\pm\%5$ -10'u kadardı; yani 25 ms'lik bir anma gecikme, ateşlemeden 22,5 ile 27,5 ms arasında herhangi bir anda gerçekleşebiliyordu. 8-15 ms aralığındaki kısa gecikmelerde ise dağılım, anma aralığını aşabiliyordu.

8 ms kuralı, kısmen bu dağılım sorununa yanıt veriyordu: nominalde eş zamanlı deliklerin gruplanmasını ve şarj kütlelerinin toplanmasını zorunlu kılarak, mevcut ateşleme sistemlerinin zamanlama belirsizliğini düzenleyici bir

yaptırımla dengeliyor ve kapsül arızası nedeniyle birden fazla deliğin eş zamanlı ateşlenmesi senaryosuna karşı bir tampon sağlıyordu.

1990'ların ortasında ticarileşen ve 2000'lerden itibaren yaygınlaşan elektronik gecikmeli kapsüller, büyük dizilerde ihmal edilebilir dağılımla $\pm 0,1-1,0$ ms zamanlama doğruluğu sağlayan sayısal zamanlama devrelerine sahiptir. Dyno Nobel Digidet, Orica Uni-tronic 600 ve Austin Powder HotShot II gibi ürünler, %99'luk dilimde genellikle $\pm 0,25$ ms'nin altında kalan zamanlama hatalarıyla 1 ms ile 10.000 ms arasında gecikme sunar (Bhushan, 2006; Ercins, 2018; Pytlik ve Mertuszka, 2021). Bu özellikler nedeniyle elektronik gecikmeli kapsüllerin kullanımı, yukarıda belirtilen ülke mevzuatındaki 8 ms kuralını köklü biçimde değiştirmiştir. Ateşleme zamanı dağılımı ortadan kalktığında, 8 ms eşiğinin dağılım temelli gerekçesi geçerliliğini yitirmektedir. Kuralın tek kalan fiziksel gerekçesi dalga formu örtüşmesidir ancak bu argüman, önceki bölümlerde elektronik gecikmeli kapsül donanımlı patlatmalardan elde edilen görgül kanıtlarla önemli eleştiriler almıştır.

7. YIKICI GİRİŞİM İLE DALGA SÖNÜMLEME

JKMRC (The Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre) araştırmacıları tarafından başlatılan ve daha sonra birçok endüstriyel ve akademik grup tarafından geliştirilen imza deliği analizi, temsili koşullar altında tek bir 'imza' deliğinin patlatılması ve titreşim dalga formunun birden fazla izleme noktasında kaydedilmesini içerir. Tek delikli kayıt, her delik için uygun zaman gecikmeleri ve sönmüleme düzeltmeleri uygulanarak doğrusal örtüşme yoluyla tam çok delikli bir patlamanın dalga formunu tahmin etmek için temel olarak kullanılmaktadır. İmza deliği analizi yaklaşımıyla yıkıcı girişim için gerekli gecikme optimizasyonunun sağlanabildiği Stachura vd. (1981) tarafından gösterilmiştir.

Blair (2004, 2008), Monte Carlo yöntemleriyle gerçekçi kapsül zamanlama dağılımını dikkate alan ve PPV aşımını olasılık temelli yaklaşımla tahmin edebilen bir doğrusal örtüşme modeli çerçevesi geliştirmiştir. Model sonuçları, PPV minimizasyonu için en uygun gecikmenin açıkça frekansa bağlı olduğunu ve bu değer 2 ms ile 100 ms arasında değişebileceğini göstermiştir. Günümüzde JKSimBlast (JKMRC), Hidrodinamik Patlatma Modeli (GHD) ve OptiBlast (Orica) gibi ticari doğrusal örtüşme modeli yazılımları mevcut olup, birden fazla kıtadaki saha verileriyle doğrulanmıştır.

İmza deliği analizi ve doğrusal örtüşme modeli metodolojilerini benimseyen araştırmacılar, 8 ms kuralı yerine frekans temelli gecikme seçimi ölçütlerinin kullanılmasını önermiştir. Minchinton ve Lynch'in (1996) 'T/2' ölçütüne göre, delikler arası gecikmenin tek katları PPV'yi minimize ederken, çift katları ise açık ocaklardaki patlatmaların büyük bölümünü kapsayan 15-62 Hz aralığında baskın frekansa sahip herhangi bir sahada yapıcı girişi maksimize etmektedir. Bu formül, 8 ms kuralının açık ocaklardaki çoğu patlatmada hem yapıcı hem de yıkıcı girişim rejimlerinde eşit olasılıkla geçerli olduğunu göstermektedir.

8. TARTIŞMA

Geçtiğimiz kırk yılı aşkın araştırma sürecinde toplanan kanıtlar, 8 ms gecikme kuralının fiziksel temelini sağlam ve tutarlı olmadığını göstermektedir. Kural, 1970'lerin ABD'sinde piroteknik kapsüllerin zamanlamasındaki dağılım ve sınırlı sayıda açık maden sahasındaki gözlemlerin birleşiminden türetilmişti ve dalga formu etkileşimini analiz etmek için kullanılan sismograflar teknik olarak yetersizdi. Modern, yüksek çözünürlüklü sismik izleme, hesaplamalı dalga formu modellemesi ve elektronik kapsüllerin kontrollü zamanlama hassasiyeti, kuralın fiziksel sınırlamalarını ortak şekilde ortaya koymuştur.

8 ms kuralı ne tamamen sezgisel ne de fiziksel temelleri açısından savunulabilir. Birçok pratik senaryoda koruyucu olmakla birlikte, tutuculuk derecesi ve hata yönü (aşırı koruyucu veya yetersiz koruyucu) sahaya özgü ve frekansa bağlı olan muhafazakâr bir mühendislik sezgisi olarak tanımlanabilir.

8 ms kuralı, aşağıdaki koşullarda yapıcı girişi önleyemeyebilir. Atıma 100-500 m mesafede ölçüm yapılan açık kömür ve metal madenleri ile taş ocaklarındaki izleme noktasında kaydedilen titreşimin baskın frekansı yaklaşık 15-40 Hz aralığında olduğunda, 8 ms gecikme aralığı baskın periyodun 0,12-0,32 katına karşılık gelir. Bu değer, kısmi yapıcı girişimin gerçekleştiği aralıkta yer alır. Sismik dalgalar, sağlam ve süreklilik gösteren granit ve bazalt gibi kayaç koşullarında daha az sönümlenir. Dalga formları uzun mesafeler boyunca tutarlılığını korur ve bu nedenle örtüşme etkileri büyük olur. Ancak elektronik gecikmeli kapsül desenleri, çok hassas zamanlama ile efektif dalga formu tutarlılığını azaltarak yapıcı girişi hafifletebilir.

8 ms kuralı, aşağıdaki koşullarda tutucu sonuçlar verebilir. Yeraltı ocaklarında sağlam ve sert kayada veya yerüstünde kısa mesafeli patlatmalarda, baskın frekans yaklaşık 60-80 Hz'i aştığında, 8 ms gecikme baskın titreşimin bir veya daha fazla tam periyoduna yaklaşmakta ya da dalga formunun doğal tutarsızlık zaman ölçeğini aşmaktadır. Ayrıca, atım geometrisinde çok sayıda küçük yarıçaplı, kısa sıkılama boylu ve sınırlı hapsolme koşullarına sahip patlatma deliği kullanıldığında, hızla bozulmaya eğilimli kısa süreli ve yüksek frekanslı dalga formları oluşur. Jeolojik heterojenlik, bitişik delikler arasında önemli saçılmaya yol açarak dalga formu tutarlılığını azaltır ve gecikme aralığından bağımsız olarak örtüşme büyüklüğünü sınırlar. 500 m'den daha uzak mesafelerde, geometrik yayılma ve saçılma yüksek frekanslı bileşenleri önemli ölçüde zayıflatır ve ilgili frekans bandını yukarı kaydırarak 8 ms gecikmelerde örtüşme riskini azaltır.

ABD ve Kanada madencilik mevzuatında doğrudan yer alan ve Avustralya gibi ülkelerin patlatma mevzuatının oluşturulmasına etki eden 8 ms kuralının uygulanmasını savunanların temel argümanı, deliklerin ateşlenmesinde en az 8 ms'lik gecikmenin patlatma tasarımındaki belirsizlikleri, delik şarjlarındaki, sıkılama kalitesindeki, kaya kütlesi özelliklerindeki değişiklikleri ve patlayıcı performansındaki sapmaları karşılamayı amaçladığıdır. Bu argüman haklılık payı taşımakla birlikte, standardın bazı bölgelerde aşırı tutucu, bazı bölgelerde ise yetersiz kalması nedeniyle düzenleyici etkinliğinin sürekliliği sorgulanabilir. Ayrıca, teknik olarak daha üstün alternatifler olan imza deliği analizi ve doğrusal örtüşme modeli yöntemleri, bölgeye özgü tahmin doğruluğu sayesinde gerektiğinde daha tutucu, 8 ms kuralının gereksiz yere tutucu olduğu yerlerde ise daha az kısıtlayıcı modeller sunabilir.

8 ms kuralının dezavantajları bilinmesine rağmen, uzun yıllardır yasal mevzuatta yerleşik bir standart olması, onu idari açıdan güçlü kılmaktadır. Kuralın daha teknik ve sahaya özgü bir ölçütle değiştirilmesi için mevzuat güncellenmeli ve patlatmalar işletmeciler tarafından izlenmelidir. Bu değişiklikler, yasal otorite açısından uygulama karmaşıklığına yol açabileceği gibi, artan uyum maliyetleri nedeniyle sektördeki işletmelerde endişe yaratabilir.

8 ms kuralı, elektronik kapsüller ve yüksek çözünürlüklü sismografların henüz kullanılmadığı 1970'li yılların teknolojisiyle elde edilen düşük

hassasiyetli verilerin görgül analizleriyle türetilmiştir. Fiziksel temelleri arasında dalga yayılımı veya titreşim mekaniği bulunmadığından bilimsel olarak geçerliliğini yitirmiş sayılır ve bu nedenle küresel ölçekte patlatma uygulamalarında kullanımı sorgulanabilir durumdadır.

Kural, birçok patlatma uygulamasında belirli ölçüde koruma sağlasa da, açık madenlerdeki patlatma operasyonlarında sıkça karşılaşılan 15-40 Hz aralığındaki baskın titreşim frekanslarında başarısız olabilir. Ayrıca, 8 ms kuralının yasal mevzuatta yer almaya devam etmesi, yıkıcı girişime dayalı patlatma modelleri geliştirilebilen İmza deliği analizi ve doğrusal örtüşme modeli gibi titreşim kontrol stratejilerinin benimsenmesini geciktirebilir. Frekans ve performans odaklı standartlar kullanan Avustralya, Güney Afrika ve Almanya gibi ülkelerde patlatma uygulamaları olumsuz etkilenmemiştir. Bu durum, yasal düzenlemelerin başarılı olması için 8 ms kuralının zorunlu olmadığını göstermektedir.

Özetle, 8 ms gecikme kuralı, sahaya özgü veriler olmadığında güvenli tarafta kalmak için tedbirli bir eşik olarak görülmelidir. Ancak saha verileri mevcutsa, İmza deliği analizi ve doğrusal örtüşme modeli yöntemlerine dayalı ve elektronik gecikmeli kapsül kullanımıyla uygulanan modern patlatma teknikleri bu kurala kıyasla çok daha başarılı sonuçlar sağlayabilir.

9. SONUÇ

8 ms kuralını katı ve evrensel bir zorunluluk olarak uygulayan mevcut yasal düzenlemelerden sahaya özgü dinamikleri dikkate alan ve optimizasyona izin veren performans tabanlı standartlara geçiş planlanmalıdır. Avustralya'da hassas operasyonlar için imza deliği analizinin zorunlu ve alternatif bir uyum yolu olarak kabul edilmesi, bu dönüşüm için başarılı bir model sunmaktadır.

Türkiye'de henüz uygulanmamakla birlikte, mevzuatında 8 ms kuralı bulunan ülkelerde faaliyet gösteren patlatma mühendisleri, yasal uyumu sağlamak ve operasyonel verimliliği artırmak için aşağıdaki teknik uygulamaları gerçekleştirebilir: Konut yapılarının 500 m ve daha yakınında yapılan tüm operasyonlarda, gecikme optimizasyonunun temelini oluşturmak amacıyla imza deliği analizi yapılabilir. Özellikle yerleşim yerlerine yakın ilk patlatmalarda veya yüksek PPV şikâyeti alınan sahalarda, patlatma tasarımları nihai hale getirilmeden önce doğrusal örtüşme modeli yazılımları kullanılarak tam dalga formu PPV tahmini yapılabilir. Titreşim kontrolü tasarlanırken,

mevcut sismograf kayıtları incelenerek kritik izleme noktalarındaki baskın frekans tespit edilmelidir. Baskın frekansın 15-40 Hz aralığında olduğu durumlarda, klasik 8 ms gecikme uygulamasıyla beklenen titreşim azaltma etkisi sağlanamayabilir.

Patlatma kaynaklı titreşim yönetiminde, pratik ve idari açıdan elverişli bir standart olarak kırk yılı aşkın süredir kullanılan 8 ms delik arası gecikme kuralının, gelişen teknolojiyle güncellenmesi gündeme alınmalıdır. Bu derlemede, kuralın dayandığı fiziksel temellerin aslında kabullerden ibaret olduğu; gelişen izleme teknolojileri, kapsül hassasiyeti ve hesaplamalı modelleme araçlarının ise bu kabuller ile gerçek dalga formunun örtüşme mekaniği arasındaki farkı daha da derinleştirdiği ortaya konmuştur.

KAYNAKÇA

- Adam, D., Adam, C., Falkner, F. J. ve Paulmichl, I. (2011). Vibration emission induced by rapid impact compaction. Proceedings 8th International Conference on Structural Dynamics, Leuven, July 4-6.
- Ercins, S. (2018). Açık ocak patlatmalarının performans analizi. Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Doktora Tezi.
- Anderson, D. A. (1989). The 8 Millisecond, "Criterion": Have We Delayed Too Long in Questioning It? Proceedings International Society of Explosives Engineers (ISEE), New York, September.
- ANZEC (1990). Technical basis for guidelines to minimise annoyance due to blasting from surface mineral workings. Australian and New Zealand Environment Council, Canberra.
- Bhushan, V. (2006). Electronic detonators - New era in blasting technology. Proceedings 32nd Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, International Society of Explosives Engineers (ISEE), Dallas, January 29-February 2.
- Blair, D. P. (1993). Blast vibration control in the presence of delay scatter and random fluctuations between blastholes. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 17(2), 95-118.
- Blair, D. P. (2004). Charge weight scaling laws and the superposition of blast vibration waves. *International Journal for Blasting and Fragmentation*, 8(4), 221-239. <https://doi.org/10.1080/13855140412331291610>
- Blair, D. P. (2008). Nonlinear superposition models of blast vibration. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(2), 235-247. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.05.002>
- Blair, D. P. (2009). Limitations of electronic delays for the control of blast vibration and fragmentation. Proceedings 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Granada, September 13-17.
- Blair, D. P., Minchinton, A. (1997). On the damage zone surrounding a single blasthole. *International Journal for Blasting and Fragmentation*, 1(1), 59-72. <https://doi.org/10.1080/13855149709408390>
- Blair, D. P., Minchinton, A. (2006). Near-field blast vibration models. Proceedings 8th International Symposium of Rock Fragmentation by Blasting, Santiago, May 7-11.

- Dowding, C. H. (1985). *Blast vibration monitoring and control*. Prentice-Hall:New Jersey.
- Farnfield, R., Adderley, G. ve Richards, D. (2025). The 8 millisecond rule is dead – or is it? Proceedings 51st Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, North Carolina, January 21-26.
- Huang, D., Qiu, X., Shi, X., Gou, Y. ve Zhou, J. (2019). Experimental and numerical investigation of blast-induced vibration for short-delay cut blasting in underground mining. *Shock and Vibration*, 2019(1), 5843516. <https://doi.org/10.1155/2019/5843516>
- Hustrulid, W. (1999). *Blasting principles for open pit mining: Vol.1-general design concepts*. Balkema:Rotterdam.
- Kuzu, C. ve Hüdaverdi, T. (2005). Evaluation of blast-induced vibrations - a case study of the Istanbul Cendere region. Proceedings 3rd EFEE World Conference on Explosives and Blasting, Brighton, September 13.
- Kopp, J. W. ve Siskind, D. E. (1986). Effects of millisecond-delay intervals on blast vibration and airblast. USBM RI 9026. U.S. Bureau of Mines.
- Lee, B-H. ve Choi, S-O. (2014). A Study on delay time control for lowering grounding vibration and noise induced by blasting (In Korean). *Explosives and Blasting*, 32(3), 18-25.
- Milev, A. M., Spottiswoode, S. M. ve Rorke, A. J. (2002). Seismic monitoring of a simulated rockburst on a wall of an underground tunnel. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 102(7), 395-400.
- Minchinton, A. ve Lynch, P. M. (1996). Fragmentation and heave modelling using a coupled discrete element gas flow code. *International Journal for Blasting and Fragmentation*, 1(1), 41-57. <https://doi.org/10.1080/13855149709408389>
- Moore, A. J. ve Richards, A. B. (2002) Time window vibration control techniques – cautionary tales for explosives engineers. Proceedings 28th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Las Vegas, February 10-13.
- PennState, (2026). *Limiting ground vibration - scaled distance*. MNG 230 Introduction to Mining Engineering, Pennsylvania State University, Department of Energy and Mineral Engineering, University Park.
- Pytlik, M. ve Mertuszka, P. (2021). Determining the timing accuracy of electronic detonators using different methods. *Materialy*

- Wysokoenergetyczne, 13, 143-156.
<https://doi.org/10.22211/matwys/0211>
- Reisz, W., McClure, R. ve Bartley, D. (2006). Why the 8 ms rule doesn't work. *The Journal of Explosives Engineering*, 23(4), 14-22.
- Richards, A. B. ve Moore, A. J. (2005). *Blast vibration course: measurement, assessment, control*. Terrock Consulting Engineers, Eltham, Victoria.
- Richards, A. B. ve Moore, A. J. (2003). The eight millisecond time window myth. Proceedings 5th Large Open Pit Conference, Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), Kalgoorlie, November 3-5.
- Richards, A. B. ve Moore, A. J. (2007). *Ground vibration frequency control*. Terrock Consulting Engineers, Eltham, Victoria.
- Shi, X. Z. ve Chen, S. R. (2011). Delay time optimization in blasting operations for mitigating the vibration-effects on final pit walls' stability. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(8), 1154-1158.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.04.004>
- Siskind, D. E., Crum, S. V. ve Plis, M. N. (1993). *Blast vibrations and other potential causes of damage in homes near a large surface coal mine in Indiana*. Report of Investigation 9455, US Bureau of Mines, Minneapolis.
- Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W. ve Dowding, C. H. (1980). *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting*. Report of Investigation 8507, US Bureau of Mines, Washington, D.C.
- Siskind, D. E. ve Stagg, M. S. (1985). *Blast vibration measurements near and on structure foundations*. Report of Investigation 8969, US Bureau of Mines, Pittsburgh.
- Sołtys, A. (2018). Firing explosive charges with millisecond delay in surface mining—historical outline. *Inżynieria Mineralna*, 20(2), 177-190.
<http://doi.org/10.29227/IM-2018-02-23>
- Stacey, T. R. ve Wesseloo, J. (1998). In situ stresses in mining areas in South Africa. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 98(7), 365-368.
- Stachura, V. J., Siskind, D. E. ve Engler, A. J. (1981). *Airblast Instrumentation and measurement techniques for surface mine blasting*. Report of Investigation 8508, US Bureau of Mines, Pittsburgh.

- Sullivan, M. (2023). *Measurement of the vibration delay window for an iron-ore mine*. International Society of Explosives Engineers, Lexington.
- Şengün, B. ve Gül, Y. (2023). Evaluation of ground vibration and air blast measurements induced by blasting in a quarry mine. *Journal of Scientific Reports-A*, 053, 131-146. <https://doi.org/10.59313/jsr-a.1225028>
- Wiss, J. F. ve Linehan, P. W. (1978). *Control of vibration and blast noise from surface coal mining*. USBM Contract J0255022 Report. Wiss, Janney, Elstner and Associates, Northbrook, Illinois.

CHAPTER 7

CONSTRUCTION OF TRAVELLING WAVE SOLUTIONS FOR THE SCHRÖDINGER-TYPE EQUATIONS

Asst. Prof. Fatma Nur KAYA SAĞLAM¹

Prof. Zehra PINAR İZGİ²

Assoc. Prof. Hüseyin KOÇAK³

DOI: <https://www.doi.org/10.5281/zenodo.21208793>

¹ Kapadokya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Teknolojileri Fakültesi , Bilgi Güvenliği Bölümü, Nevşehir, Türkiye. fatma.saglam@kapadokya.edu.tr, orcid id: 0000-0001-7488-3254

² Tekirdağ Namik Kemal Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi , Matematik Bölümü, Tekirdağ, Türkiye. zpinar@nku.edu.tr, orcid id: 0000-0002-9344-7308

³ Pamukkale Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi , İşletme Bölümü, Denizli, Türkiye. hkocak@pau.edu.tr, orcid id: 0000-0001-9683-6096

1. INTRODUCTION

Nonlinear partial differential equations (NLPDEs) play a central role in the mathematical formulation of physical laws, as they describe the evolution of complex phenomena in fields such as fluid dynamics, plasma physics, nonlinear optics, and quantum mechanics. Among these, one of the most significant equations is the Schrödinger equation, which governs the dynamics of wave functions and provides fundamental insights into the energy spectrum and behavior of quantum systems. Analytical solutions of Schrödinger-type equations are particularly important, as they allow for an exact characterization of energy levels, tunneling effects, coherence, and oscillatory phenomena in quantum models [1-6].

Over the years, numerous analytical and semi-analytical methods have been developed to study Schrödinger-type equations, including the Kumar–Malik method [7-9], the modified extended tanh expansion method [10], the Bernoulli auxiliary equation method [11], the multi-wave technique [12], the generalized exponential rational function method [13], the first integral method [14], the perturbation-iteration algorithm [15], the unified solver method [16], the Painlevé analysis [17], the q-homotopy analysis transform method [18], the Lie symmetry method [19], and the auxiliary equation method [20]. These approaches have generated a wide range of exact and approximate wave solutions, enriching both theoretical understanding and practical applications. However, there remains a need for systematic frameworks capable of producing generalized solution families for higher-order nonlinear Schrödinger equations.

The fifth-order nonlinear Schrödinger equation, which represents one of the most general forms of this class, can be defined as:

$$\begin{aligned}
 i\Omega_x + A\left(\frac{1}{2}\Omega_{tt} + \Omega|\Omega|^2\right) - iB(\Omega_{ttt} + 6|\Omega|^2\Omega_t r_1 + 6\Omega^2\Omega_t^* r_2 + \\
 \Omega(|\Omega|^2)_t r_3 + (\Omega|\Omega|^2)_t r_4) + C(\Omega_{tttt} + 6\Omega^*\Omega_t^2 r_5 + 4\Omega|\Omega_t|^2 r_6 + \\
 8|\Omega|^2\Omega_{tt} r_7 + 2\Omega^2\Omega_{tt}^* r_8 + 6\Omega|\Omega|^4 r_9) - iD(\Omega_{ttttt} + \\
 10|\Omega|^2\Omega_{ttt} r_{10} + 30|\Omega|^4\Omega_t r_{11} + 10\Omega\Omega_t\Omega_{tt}^* r_{12} + \\
 10\Omega\Omega_t^*\Omega_{tt} r_{13} + 20\Omega^*\Omega_t\Omega_{tt} r_{14} + 10\Omega_t^2\Omega_t^* r_{15}) = 0,
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

when

1. $B = 0, C = 0, D = 0, A = 1,$

$$i\Omega_x + \frac{1}{2}\Omega_{tt} + |\Omega|^2\Omega = 0, \quad (1.2)$$

standard Schrödinger equation [21-23],

$$2. \quad C = 0, D = 0, A = 1, r_2 = 0, r_1 = 1,$$

$$i\Omega_x + \Omega_{tt} + |\Omega|^2\Omega + iB(\Omega_{ttt} + 6r_1|\Omega|^2\Omega_t) = 0, \quad (1.3)$$

Schrödinger-Hirota equation [24-25],

$$3. \quad C = 0, D = 0, A = 1, r_2 = \frac{1}{2}, r_1 = \frac{3}{2},$$

$$i\Omega + \Omega_{tt} + |\Omega|^2\Omega + iB(\Omega_{ttt} + 9|\Omega|^2\Omega_t + 3\Omega^2\Omega_t^*) = 0, \quad (1.4)$$

Sasa-Satsuma equation [26-29],

$$4. \quad D = 0, B = 0, A = 1, r_i = 1 \quad (i = 5 \dots 9),$$

$$i\Omega_x + \Omega_{tt} + 2|\Omega|^2\Omega + \gamma(\Omega_{tttt} + 6\Omega^*(\Omega_t)^2 + 4|\Omega_t|^2\Omega + 8|\Omega|^2\Omega_{tt} + 2\Omega^2\Omega_{tt}^* + 6|\Omega|^4\Omega) = 0, \quad (1.5)$$

Lakshmanan-Porsezian-Daniel(LPD) equation, which is a fourth-order nonlinear Schrödinger equation [30],

$$5. \quad D = 0, C = 0, r_1 = 0, r_2 = 0, r_3 \neq 0, r_4 \neq 0,$$

$$i\Omega_x + \frac{1}{2}A\Omega_{tt} + A|\Omega|^2\Omega + iB(r_3\Omega(|\Omega|^2)_t + r_4(|\Omega|^2\Omega)_t - \Omega_{ttt}) = 0, \quad (1.6)$$

equation [21-22,31],

$$6. \quad C = 0, B = 0, A = 1, r_i = 1 \quad (i = 10 \dots 15),$$

$$i\Omega_x + \left(\frac{1}{2}\Omega_{tt} + \Omega|\Omega|^2\right) - iD(\Omega_{ttttt} + 10|\Omega|^2\Omega_{ttt} + 30|\Omega|^4\Omega_t + 10\Omega\Omega_t\Omega_{tt}^* + 10\Omega\Omega_t^*\Omega_{tt} + 20\Omega^*\Omega_t\Omega_{tt} + 10\Omega_t^2\Omega_t^*) = 0, \quad (1.7)$$

fifth order nonlinear Schrödinger equation [32-33],

$$7. \quad D = 0, \quad r_1 = r_3 = r_4 = r_9 = 1, \quad r_6 = r_7 = r_8 = 0, \quad r_i = 0 \quad (i = 10 \dots 15),$$

$$i\Omega_x + A\Omega_{tt} + iB\Omega_{ttt} + C\Omega_{tttt} + iBr_4(|\Omega|^2\Omega)_t + \quad (1.8)$$

$$iBr_1|\Omega|^2\Omega_t + i(|\Omega|^2)_t\Omega = A|\Omega|^2\Omega + D|\Omega|^4\Omega,$$

equation [34-39],

$$8. \quad D = 0, r_i = 0 \quad (i = 1, \dots, 8),$$

$$i\Omega_x - \frac{1}{2}\alpha_1\Omega_{tt} + \beta_1|\Omega|^2\Omega - \frac{1}{6}\alpha_2\Omega_{ttt} - \frac{1}{24}\alpha_3\Omega_{tttt} - \quad (1.9)$$

$$\beta_2|\Omega|^4\Omega = 0,$$

reduction to nine equations, including the nonlinear Schrödinger equation with high dispersion [40-43].

$$9. \quad \text{In addition to these equations,}$$

$$i\Omega_t + \varepsilon(\Omega_{xx} + \Omega_{yy}) + i \left(\begin{array}{l} c_1(\Omega\Omega_x^* - \Omega^*\Omega_x) \\ + c_2(\Omega\Omega_y^* - \Omega^*\Omega_y) \end{array} \right) \rho = 0, \quad (1.10)$$

the Chiral nonlinear Schrödinger equation [44-48] will be discussed.

In this study, we address by employing the Bernoulli equation method to derive travelling wave solutions of the fifth-order nonlinear Schrödinger equation. The obtained solutions are systematically analyzed, illustrated, and verified using computational tools. This approach not only broadens the set of available exact solutions but also provides a flexible methodology that can be extended to other nonlinear quantum systems.

The remainder of the paper is organized as follows: Section 2 briefly presents the ansatz-based method used in this study. Analytical solutions are derived in Section 3. Section 4 illustrates the solutions through graphical representations. Finally, Section 5 provides the conclusions of the results.

2. MATERIAL AND METHOD

This subsection provides the ansatz-based methodology results in novel and differentiated findings [20].

Let us consider the following NLPDE:

$$P(\Omega, \Omega_x, \Omega_t, \Omega_{xx}, \Omega_{tt}, \Omega_{xt} \dots) = 0, \quad (2.1)$$

where $P = P(x, t)$ is a polynomial equation.

Using the subsequent complex wave transformation,

$$\Omega(x, t) = u(\xi) \exp(i(kx - wt)), \quad \xi = x - ct, \quad (2.2)$$

$$c \neq 0, \quad k \neq 0, \quad w \neq 0,$$

then Eq.(2.1) is transferred to the following nonlinear ordinary differential equation (NODE):

$$O(u, u', u'', \dots) = 0. \quad (2.3)$$

Assume that Eq.(2.3) is considered in the subsequent form

$$u(\xi) = \sum_{i=0}^N g_i z^i(\xi), \quad (2.4)$$

in which g_i ($i = 0 \dots N$) are real constants, and the function $z(\xi)$ satisfies the equation in the follows:

When Bernoulli type auxiliary equation, then we define

$$z' = Pz(\xi) + Qz^2(\xi) + L, \quad (2.5)$$

where P , Q , and L parameters and its solution is

$$z(\xi) = \frac{1}{2Q} \left(\sqrt{-P^2 + 4QL} \tan \left(\frac{(C_2 + \xi) \sqrt{-P^2 + 4QL}}{2} \right) - P \right). \quad (2.6)$$

in which C_2 is integration constant.

When second order linear ordinary differential auxiliary equation (SOLODE), then we define

$$(z')^2 = -PQz(\xi) + PM, \quad (2.7)$$

where P , M , and Q parameters and its solution is

$$z(\xi) = C_1 \cos(\xi \sqrt{PQ}) + C_2 \sin(\xi \sqrt{PQ}) + \frac{M}{Q}, \quad (2.8)$$

in which C_1, C_2 are integration constants.

By substituting Eqs.(2.4)-(2.7) into Eq. (2.3), then the coefficients of identical powers of $z(\xi)$ are collected. This procedure generates a nonlinear algebraic system. The resulting system is solved symbolically with the aid of Maple software to determine the unknown constants. Once the admissible parameter values are obtained, rogue wave solutions of the original nonlinear model are constructed systematically.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Consider the wave transformation defined as

$$\Omega(x, t) = u(\xi)\exp(i(kx - wt)), \quad \xi = x - ct, \quad (3.1)$$

$$c \neq 0, \quad k \neq 0, \quad w \neq 0.$$

By applying the above wave transformation to the considered equation, the corresponding real and imaginary parts are obtained.

Case i: Under the above transformation, the nonlinear ordinary differential system (NODS) corresponding to Eq.(1.2) can be formulated as follows:

$$\left(w - \frac{1}{2}w^2\right)u + \frac{1}{2}cu'' + u^3 = 0, \quad (3.2)$$

$$(-c + wc)u' = 0. \quad (3.3)$$

Employing the balancing procedure between the highest derivative term and nonlinear term gives $N=1$. Hence, the solution in Eq.(2.3) is expressed as

$$u(\xi) = g_0 + g_1z(\xi), \quad (3.4)$$

whereas g_0 and g_1 are the arbitrary parameters to be determined. Assume that $z(\xi)$, represents the solution of the NODE:

$$z' = Pz(\xi) + Qz^2(\xi) + L. \quad (3.5)$$

Replacing Eqs.(3.4) and (3.5) into Eq. (3.2) leads to a system of algebraic equations. Solving this system with Maple provides the next parameter set:

$$c = -\frac{g_1^2}{R^2}, P = \frac{(2g_0^2+1)R}{2g_1^2}, Q = \frac{2Rg_0}{g_1}. \quad (3.6)$$

Using these obtained constants, the analytical solution related to Eq.(1.2) is obtained as

$$\Omega_1(x, t) = \exp((kx - wt)i) \sqrt{\frac{1}{2}} \tan \left(\left((x + C_1)R^2 + g_1^2 t \right) \sqrt{\frac{1}{2g_1^2}} \right). \quad (3.7)$$

Case ii: After implementing the wave transformation, Eq.(1.3) is reduced to the following nonlinear ordinary differential system:

$$6 \left(Bwr_1 + \frac{1}{6} \right) u^3 + (3Bw + 1)c^2 u'' + (-Bw^3 - w^2 - k)u = 0, \quad (3.8)$$

$$-6Br_1 cu^2 u' - Bc^3 u''' + \left(3w \left(Bw + \frac{2}{3} \right) + 1 \right) u' = 0. \quad (3.9)$$

If we integrate Eq.(3.9) with respect to the ξ and assume the integration constant as zero and the homogeneous balance principle is applied between Eqs.(3.8) and (3.9), we get the following constraint conditions:

$$k = -\frac{B^2cw^3 - 9B^2w^3 + Bcw^2 - 9Bw^2 - 3Bw - 2w - 1}{cB}, \quad (3.10)$$

$$r_1 = \frac{1}{2}.$$

Since the balance between the nonlinear term u^3 and the derivative term u'' , gives $N = 1$. Then, Eq.(2.3) becomes

$$u(\xi) = g_0 + g_1 z(\xi), \quad (3.11)$$

whereas g_0 and g_1 are the arbitrary parameters to be determined. Assume that $z(\xi)$, represents the solution of the NODE:

$$z' = Pz(\xi) + Qz^2(\xi) + L. \quad (3.12)$$

Substituting Eqs.(3.11)–(3.12) into Eq.(3.8) yields an algebraic system, which is solved by Maple to determine the unknown parameters. Solving this system then yields the following parameters:

$$Q = \frac{i}{2} \sqrt{2} g_1, R = \frac{-\frac{i}{4} (BP^2 c^3 + 6Bw^2 + 4w + 2) \sqrt{2}}{g_1 c^2 B}, \quad (3.13)$$

$$g_0 = -\frac{i}{2} P \sqrt{2} c.$$

Using the determined parameters, the form of the solution for Eq.(1.3) is derived as:

$$\Omega_2(x, t) = i \exp((kx - wt)i) \tan\left(\frac{\sqrt{2} A (ct - C_1 - x)}{\sqrt{2}}\right) A, \quad (3.14)$$

$$A = \sqrt{\frac{(3Bw^2 + 2w + 1)}{c^3 B}},$$

Case iii: After implementing the wave transformation, Eq. (1.4) is reduced to the following nonlinear ordinary differential system:

$$\left(3wB - 9\left(wB - \frac{1}{9}\right)\right)u^3 - \left(3wB - \frac{1}{2}\right)c^2 u'' \quad (3.15)$$

$$- \left(-w^3 B + \frac{1}{2} w^2 + k\right) u = 0,$$

$$-12Bcu^2 u' - Bc^3 u'''$$

$$+ \left(3w\left(wB - \frac{1}{3}\right)c + 1\right)u' = 0. \quad (3.16)$$

By employing the balancing principle to Eq.(3.15), we determine that $N = 1$, which allows Eq.(2.3) to be expressed in the following form:

$$u(\xi) = g_0 + g_1 z(\xi), \quad (3.17)$$

whereas g_0 and g_1 are the arbitrary parameters to be determined. Assume that $z(\xi)$, represents the solution of the NODE:

$$z' = Pz(\xi) + Qz^2(\xi). \quad (3.18)$$

Substituting Eqs.(3.17)–(3.18) into Eq.(3.15) yields an algebraic system, which is solved by Maple to determine the unknown parameters. Solving this system then yields the next parameters:

$$P = \frac{\sqrt{\frac{6(-c+12B)}{c}}}{cB}, Q = \frac{i\sqrt{2}g_1}{c}, k = -\frac{1}{108B^2}, w = \frac{1}{6B}, g_0 = \frac{-\frac{i}{4}\sqrt{\frac{(-c+12B)}{3c}}}{B}. \quad (3.19)$$

Substitution of the identified parameters leads to the following solution of Eq.(1.4):

$$\Omega_3(x, t) = -\frac{\left(\begin{array}{c} i\sqrt{3\left(\frac{c-12B}{c}\right)} \\ \times (PC_1 \exp(P(ct-x)) + Q) \\ + 12g_1PB \end{array} \right) \exp((kx - wt)i)}{12B(\exp(P(ct-x))PC_1 - Q)}. \quad (3.20)$$

Case iv: By applying the wave transformation, Eq.(1.5) is converted into the following nonlinear ordinary differential system:

$$16w\gamma c u'^2 + (1 + 2cwA - 4cw^3\gamma)u' + 4c^3\gamma w u''' = 0, \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} &(-20\gamma w^2 + 2)u^3 + 10\gamma c^2 u^2 u'' + 6u^5\gamma + 10\gamma c^2 u(u')^2 \\ &+ \gamma c^4 u^{(iv)} + (-6\gamma w^2 c^2 + Ac^2)u'' + (\gamma w^4 - k - Aw^2)u = 0. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Employing the balancing procedure between the highest derivative term and nonlinear term gives $N=1$. Eq.(2.3) to be represented as:

$$u(\xi) = g_0 + g_1 z(\xi), \quad (3.23)$$

whereas g_0 and g_1 are the arbitrary parameters to be determined. Assume that $z(\xi)$, represents the solution of the NODE:

$$(z')^2 = -pqz(\xi) + pm. \quad (3.24)$$

Substituting Eqs.(3.23)–(3.24) into Eq.(3.21) yields an algebraic system, which is solved by Maple to determine the unknown parameters. Solving this system then yields the next parameters:

$$\begin{aligned}
 g_0 &= -\frac{\sqrt{10\gamma(-20\gamma w^2 + 5A - 1)}}{20\gamma}, \\
 k &= -3\gamma w^4 - 4\gamma w^2 g_0^2 + 78\gamma g_0^4 - \frac{1}{5}w^2 - \frac{2}{5}g_0^2, \\
 p &= -\frac{(10\gamma w^2 - 30\gamma g_0^2 - 1)}{5c^2\gamma q}, g_1 = g_0 \frac{(10\gamma c^2 p q + 30\gamma w^2 - 30\gamma g_0^2 - 3)}{5c^2 m \gamma p}, \\
 C_1 &= \frac{10}{q(10\gamma w^2 + 30\gamma g_0^2 - 1)} \sqrt{\left(\gamma w^2 - \frac{1}{10}\right)^2 (C_2 q + m) \times ((-9m)^2 - (3C_2 q)^2) \times g_0^4 \gamma^2 (-C_2 q + m)}.
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Using the determined parameters, the form of the solution for Eq.(1.5) is derived as:

$$\begin{aligned}
 \Omega_4(x, t) &= \left(\frac{mg_1}{q} - g_1 \sin(A) C_2 + g_1 \cos(A) C_2 \right) \exp((kx - wt)i), \\
 &\quad - \frac{\sqrt{10\gamma(-20\gamma w^2 + 5A - 1)}}{20\gamma} \\
 A &= \sqrt{\frac{-10\gamma w^2 + 30\gamma g_0^2 + 1}{5c^2\gamma}} (ct - x).
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

Case v: Under the wave reduction introduced above, Eq.(1.6) leads to the following nonlinear ordinary differential system:

$$c^3 B u''' + (-2B(r_3 + r_4)c - Br_4 c) u^2 u' \tag{3.27}$$

$$+(cw(-3Bw + A) + 1)u' = 0,$$

$$(2B(r_3 + r_4)w + (Bwr_4 + A))u^3 - \left(3Bw - \frac{A}{2}\right)c^2 u'' \tag{3.28}$$

$$- \left(-Bw^3 + \frac{1}{2}Aw^2 + k\right)u = 0.$$

Through the balancing procedure applied to Eq.(3.27), N is found to be 1, which allows Eq.(2.3) to be presented as:

$$u(\xi) = g_0 + g_1 z(\xi), \tag{3.29}$$

whereas g_0 and g_1 are the arbitrary parameters to be determined. Assume that $z(\xi)$, represents the solution of the NODE:

$$z' = \frac{g_0 \sqrt{12r_3 + 18r_4}}{3c} z(\xi) + \frac{g_1 \sqrt{12r_3 + 18r_4}}{6c} z^2(\xi). \quad (3.30)$$

Substituting Eqs.(3.29)–(3.30) into Eq.(3.27) yields an algebraic system, which is solved by Maple to determine the unknown parameters. Solving this system then yields the next parameters:

$$A = \frac{3Bcw^2 - 2Bcg_0^2 - 1}{cw}, \quad r_3 = -3 - \frac{3r_4}{2}, \quad (3.31)$$

$$k = -\frac{Bcw^4 + 4Bcw^2g_0^2 + 4Bcg_0^4 - w^2 + 2g_0^2}{2cw}.$$

By inserting the above parameters, the solution associated with Eq.(1.6) can be expressed as follows:

$$\Omega_5(x, t) = \exp((kx - wt)i)g_0 \frac{2\exp\left(\left(\frac{3g_0(ct - x)}{c}\right)i\right)C_1g_0 + g_1}{2\exp\left(\left(\frac{3g_0(ct - x)}{c}\right)i\right)C_1g_0 - g_1}. \quad (3.32)$$

Case vi: Following the application of the wave transformation, Eq.(1.7) is reduced to the nonlinear ordinary differential system given below:

$$-60Dw^2cu'u^2 + 40Dc^3uu'u'' + Dc^5u^{(v)} + \left(\frac{wc + 1}{+5w^4Dc}\right)u' - \quad (3.33)$$

$$10Dw^2c^3u''' + 10Dc^3u'u'' + 30Dcu'u^4 + 10Dc^3u'''u^2 = 0, \quad (3.34)$$

$$(20Dw^3 + 1)u^3 - 50Dwc^2u^2u'' - 20Dwc^2uu'^2$$

$$+ \left(-k - \frac{w^2}{2} - Dw^5\right)u + \left(\frac{c^2}{2} + 10Dc^2w^3\right)u'' - 30Dwu^5$$

$$-5Dwc^4u^{(iv)} - 30Dwc^2uu'' = 0.$$

A balance between the nonlinear term and the highest-order derivative term shows that $N = 1$. Accordingly, the solution form in Eq.(2.3) is taken as

$$u(\xi) = g_0 + g_1 z(\xi), \quad (3.35)$$

whereas g_0 and g_1 are the arbitrary parameters to be determined. Assume that $z(\xi)$, represents the solution of the NODE:

$$\left(\frac{dz}{d\xi}\right)^2 = pqz(\xi) + pm. \quad (3.36)$$

Substituting Eqs.(3.35)–(3.36) into Eqs.(3.33)-(3.34) yields an algebraic system, which is solved by Maple to determine the unknown parameters. Solving this system then yields the subsequent parameters:

$$\begin{aligned} k &= \frac{2023087}{21888000} + \frac{33C_1^2 g_1^2 (1 - \cos(A)^2)}{19} + \frac{33\cos(A)C_2 g_1^2 (C_2 \cos(A) - 2\sin(A)C_1)}{19}, \\ A &= \frac{77\sqrt{11}q\xi}{120c^2q}, m = \frac{13q}{24g_1}, p = \frac{65219}{14400c^2q}, D = \frac{259200i}{320942699\sqrt{222}}, \\ w &= \frac{77i}{720\sqrt{222}}, g_0 = \frac{-77}{120}. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Using the above parameters, the form of the solution for Eq.(1.7) is derived as:

$$\Omega_6(x, t) = ((kx - wt)i) \left(C_1 g_1 \cos(A) - C_2 g_1 \sin(A) - \frac{1}{10} \right). \quad (3.38)$$

Case vii: Upon employing the wave transformation, Eq.(1.8) is converted into the following nonlinear ordinary differential system:

$$\left((2(Br_4 + 1) + B(r_1 + r_4))w - A \right) u^3 + Cc^4 u^{(iv)} \quad (3.39)$$

$$-2c^2 \left(3Cw^2 - \frac{3}{2}Bw - \frac{1}{2}A \right) u''$$

$$-2 \left(-\frac{1}{2}Cw^4 + \frac{1}{2}Bw^3 + \frac{1}{2}Aw^2 + \frac{1}{2}k \right) u - Du^5 = 0,$$

$$\left(-2c(Br_4 + 1) - cB(r_1 + r_4) \right) u^2 u' + 2c^3 \left(2Cw - \frac{1}{2}B \right) u''' \quad (3.40)$$

$$+ \left(2cw \left(-2Cw^2 + \frac{3}{2}Bw + A \right) + 1 \right) u' = 0.$$

From the homogeneous balance condition applied to Eq.(3.40), one obtains $N=1$. Consequently, Eq.(2.3) is reduced to

$$u(\xi) = g_0 + g_1 z(\xi), \quad (3.41)$$

whereas g_0 and g_1 are the arbitrary parameters to be determined. Assume that $z(\xi)$, represents the solution of the NODE:

$$z' = Pz(\xi) + Qz^2(\xi). \quad (3.42)$$

Substituting Eqs.(3.41)–(3.42) into Eq.(3.40) yields an algebraic system, which is solved by Maple to determine the unknown parameters. Solving this system then yields the next parameters:

$$\begin{aligned} A &= \frac{6\left(-\frac{16}{9}Ccw^3 + Bcw^2 + \frac{5}{18}\right)C(\sqrt{6CD})(4Cw - B) + D(16Cw + B)}{16C^3w^2 - 8w\left(\frac{16Dw}{3} + B\right)C^2 + B\left(-\frac{16Dw}{3} + B\right) - \frac{B^2D}{6}c}, \\ k &= \frac{\left(-8C^3w^5 + 12BC^2w^4 + \left(-8AC^2 - \frac{21}{2}B^2C\right)w^3\right)2wc^2}{(-4Cw + B)^2c^2} \\ &+ \frac{(-8C^2w^3 + 6BCw^2 + (12AC + 3B^2)w + AB)c + 4C}{(-4Cw + B)^2c^2}, \\ g_0 &= \sqrt{-\frac{2((-64C^2w^3 + 36BCw^2 + 16ACw + AB)c + 10C) \times \left(\frac{1}{2} + wc\left(-2Cw^2 + \frac{3}{2}Bw + A\right)c\right)}{A(-4Cw + B)^2c^2}}, \\ r_4 &= \frac{\left(-48\left(-\frac{4}{3}Bwr_1 + A - \frac{8}{3}w\right)w^2C^2 - (2 + (r_1 + 3)B)AB - 16w\left(\frac{9B^2wr_1}{4} + \left(\frac{9w}{2} + \left(r_1 - \frac{3}{2}\right)A\right)B + 2A\right)C - (10Br_1 + 20)C\right)c}{3((-64C^2w^3 + (36Bw^2 + 16Aw)C + AB)c + 10C)B}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Using the above parameters, the form of the solution for Eq.(1.8) is derived.

Case viii: Following the application of the travelling wave transformation, Eq.(1.9) is reduced to the nonlinear ordinary differential system given below:

$$\beta_1 u^3 + \left(-\frac{\alpha_1}{2} + \frac{w^2}{6}\left(-\frac{3w\alpha_3}{2} + 3\alpha_2\right)\right)c^2 u'' + \left(\frac{w^2\alpha_1}{2} - k\right)u \quad (3.44)$$

$$\begin{aligned}
 & -\beta_2 u^5 + \frac{w\alpha_3}{24} c^4 u^{(iv)} + \frac{w^3}{24} (w\alpha_3 - 4\alpha_2) u = 0, \\
 & -\left(w\alpha_1 + \frac{w^2}{6} (w\alpha_3 - 3\alpha_2) \right) cu' + u \\
 & -\frac{w}{6} c^3 (-w\alpha_3 + \alpha_2) u''' = 0.
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

Using the balancing principle gives $N = 1$, thus Eq.(2.3) can be represented as:

$$u(\xi) = g_0 + g_1 z(\xi), \tag{3.46}$$

whereas g_0 and g_1 are the arbitrary parameters to be determined. Assume that $z(\xi)$, represents the solution of the NODE:

$$z' = Pz(\xi) + Qz^2(\xi). \tag{3.47}$$

Substituting Eqs.(3.46)–(3.47) into Eqs.(3.44)-(3.45) yields an algebraic system, which is solved by Maple to determine the unknown parameters.

Solving this system then yields the next parameters:

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{(\beta_2 w^3 \alpha_3^3)^{1/4} g_1}{w \alpha_3 c}, P = \frac{2\beta_2 g_0 w^2 \alpha_3^2}{c(\beta_2 w^3 \alpha_3^3)^{3/4}}, \alpha_1 = \frac{cw^2 \alpha_2 + 3}{3wc}, \\
 \alpha_3 &= \frac{3(cw\alpha_1 - 1)}{w^3 c}, \\
 k &= \frac{1}{24c(cw\alpha_1 - 1)} \left(-12g_0^2 c \left(-1 + \alpha_1 \left(w - \frac{2}{3} \right) c \right) \sqrt{\frac{3\beta_2 w^2 (cw\alpha_1 - 1)}{c}} \right. \\
 & \quad \left. + 3(cw\alpha_1 - 1) \left(\left(\frac{16\beta_2 g_0^4}{3} + w^2 \alpha_1 \right) c + 3w \right) \right), \\
 g_0 &= \frac{1}{10\beta_2 (cw\alpha_1 - 1)} \\
 & \times \sqrt{30(cw\alpha_1 - 1) \left(\frac{w\beta_2 \left(-1 + \alpha_1 \left(w - \frac{2}{3} \right) c \right)}{\sqrt{\frac{3\beta_2 (cw\alpha_1 - 1)}{c}} + 2cw\alpha_1 \beta_1 - 2\beta_1} \right)}.
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

Employing the calculated parameters, the solution corresponding to Eq.(1.9) is obtained as:

$$\Omega_7(x, t) = \exp \left(\left(\frac{-xg_0^2 \left(-2 + cw^2 \left(w - \frac{2}{3} \right) \alpha_2 \right) \sqrt{\beta_2 \alpha_2}}{-2 \left(-\frac{cw^3 x \alpha_2}{24} + \left(ct - \frac{x}{2} \right) w - \frac{2cx\beta_2 g_0^4}{3} \right) w \alpha_2} \right) i \right) \frac{g_0 (AC_1 g_0 + g_1)}{(AC_1 g_0 - g_1)}, \quad (3.49)$$

$$A = 2 \exp \left(\frac{2\beta_2 g_0 \alpha_2^2 (ct - x)}{c(\beta_2 \alpha_2^3)^{3/4}} \right).$$

Case ix: Following the application of the travelling wave transformation, Eq.(1.10) is reduced to the nonlinear ordinary differential system given below:

$$(2\epsilon k_1 + 2\epsilon k_2 - c)u'^3 + (2\epsilon k_1 + 2\epsilon k_2)uu'u'' + \left((k_2 + k_1)w + \quad (3.50)$$

$$ck_1 k_2 - \epsilon(k_1^3 + k_2^3 + 3k_1^2 k_2 + 3k_2^2 k_1) \right) u'u^2 = 0,$$

$$-2\epsilon k_1 k_2 u^2 u'' - (wk_1 k_2 + \epsilon k_1 k_2^3 + \epsilon k_1^3 k_2) u^3 + 2\epsilon u'^2 u'' \quad (3.51)$$

$$+ \left((k_2 + k_1)c + w - \epsilon(3k_2^2 - 4k_1 k_2 - 3k_1^2) \right) uu'^2 = 0.$$

Applying the balancing principle yields $N = 1$. Hence, Eq.(2.3) can be written as:

$$u(\xi) = g_0 + g_1 z(\xi), \quad (3.52)$$

whereas g_0 and g_1 are the arbitrary parameters to be determined. Assume that $z(\xi)$, represents the solution of the NODE:

$$\left(\frac{dz}{d\xi} \right)^2 = pqz(\xi) + pm. \quad (3.53)$$

Substituting Eqs.(3.52)–(3.53) into Eqs.(3.50)–(3.51) yields an algebraic system, which is solved by Maple to determine the unknown parameters. Solving this system then yields the subsequent parameters:

$$c = (k_2 + k_1)\epsilon, m = -\frac{qg_0}{g_1}, w = 2\epsilon pq + (k_1^2 + k_2^2)\epsilon. \quad (3.54)$$

By inserting the obtained parameters, the solution associated with Eq.(1.0) can be expressed as follows:

$$\Omega_8(x, y, t) = g_1 \exp((k_1 x + k_2 y - wt)i) \times \begin{pmatrix} -\sin(\sqrt{pq}(ct - x - y)) C_2 \\ +\cos(\sqrt{pq}(ct - x - y)) C_1 \end{pmatrix}. \quad (3.55)$$

4. GRAPHICAL EXPLANATION

In this section, we present the graphical representation of solutions successfully derived through the ansatz-based method for Schrödinger-type equations with nine different potential functions.

Figure 1. The diagram of $|\Omega_1(x,t)|$ when $k = 1$, $C_1 = 0.5$, $w = 1$, $R = -1$, $g_1 = 1.2$, $g_0 = 1$. The 3D graphical profile illustrates a strongly localized wave structure containing multiple high-amplitude peaks distributed over the computational domain. These pronounced elevations indicate that the wave energy is concentrated at specific spatial-temporal locations, whereas the surrounding regions remain comparatively close to the equilibrium level. Such a configuration reflects the emergence of transient amplification phenomena generated by the interplay between nonlinear and dispersive mechanisms. Furthermore, the nonuniform distribution of the peak heights demonstrates that the solution amplitude varies significantly during propagation, implying a dynamically modulated wave behavior. The narrow and steep nature of the observed peaks suggests rapid changes in the solution envelope, which is commonly associated with intense nonlinear interactions. In contrast, the gradual reduction of amplitude away from the dominant peaks confirms the localized character of the obtained structure. The figure verifies that the derived analytical solution exhibits complex propagation dynamics involving localized energy concentration, variable peak intensities, and temporally evolving wave patterns.

Figure 2. The diagram of $|\Omega_2(x,t)|$ when $C_1 = 0.5$, $c = 1$, $k = 1$, $w = -1$, $B = 2$. The graphical representation of $|\Omega_2(x,t)|$ exhibits a repetitive sequence of sharply localized peaks distributed along the propagation direction. These periodic elevations indicate that the corresponding solution possesses an oscillatory wave structure with regularly recurring amplitude maxima. The concentration of energy around narrow spatial regions, together with the persistence of successive peaks, reflects the combined influence of dispersion and nonlinear interaction terms contained in the governing model. Moreover, the peak magnitudes are not entirely uniform, revealing that the amplitude undergoes gradual modulation as the variables evolve. The steep gradients surrounding each crest suggest rapid transitions in the wave envelope, while the comparatively small values between adjacent peaks confirm the localized nature of the oscillatory pattern. This behavior is characteristic of strongly nonlinear wave propagation in higher-order Schrödinger-type systems. The figure demonstrates that the derived solution represents a periodically modulated wave profile with localized high-intensity structures and stable recurring propagation characteristics.

Figure 3. The diagram of $|\Omega_3(x,t)|$ when $C_1 = 0.5$, $g_1 = 1.2$, $c = 1$, $B = 0.6$. The 3D profile of $|\Omega_3(x,t)|$ displays a regularly repeating wave structure composed of successive localized peaks with nearly uniform amplitudes throughout the computational domain. This periodic arrangement indicates that the corresponding analytical solution preserves its wave form during propagation and maintains a stable oscillatory behavior over time. In addition, the close similarity in peak heights suggests that the energy distribution remains balanced along the travelling direction, with no significant amplification or attenuation effects. The narrow spacing between adjacent maxima reflects a high-frequency modulation pattern, while the sharp crests and rapid descents indicate strong nonlinear interactions within the system. The comparatively low values between neighboring peaks further emphasize the localized character of

each oscillatory pulse. The figure confirms that the obtained solution corresponds to a stable periodic wave pattern with persistent amplitude, regular repetition, and coherent propagation dynamics.

Figure 4. The diagram of $|\Omega_4(x,t)|$ when $\gamma = 2$, $C_2 = 0.5$, $c = 0.5$, $m = 1$, $q = 2$, $w = 1.2$. The 3D surface of $|\Omega_4(x,t)|$ reveals a dense periodic wave configuration consisting of closely spaced high-amplitude peaks extending throughout the computational domain. The regular repetition of these elevations indicates that the corresponding analytical solution possesses a coherent oscillatory structure with sustained propagation characteristics. Furthermore, the nearly uniform peak heights demonstrate that the amplitude remains stable during the evolution process, suggesting an equilibrium between the nonlinear and dispersive effects represented in the governing equation. The narrow intervals between successive maxima imply a high-frequency wave modulation, while the sharp crest formations reflect rapid variations in the solution profile. The regions between adjacent peaks remain near lower amplitude levels, emphasizing the localized nature of each oscillatory component. The figure confirms that the derived solution corresponds to a persistent periodic wave pattern characterized by stable amplitude distribution, regular spatial repetition, and strong structural coherence.

Figure 5. The diagram of $|\Omega_5(x,t)|$ when $C_1 = -1$, $B = 2$, $c = 1$, $w = 2$, $g_1 = 2$, $g_0 = 1$. The graphical profile of $|\Omega_5(x,t)|$ exhibits a sequence of strongly localized peaks concentrated within specific regions of the computational domain. These pronounced amplitude elevations indicate the formation of high-intensity wave packets, whereas the surrounding areas remain comparatively close to lower amplitude values. Such a distribution reflects the presence of localized energy concentration generated by the interaction of nonlinear and dispersive effects. Moreover, the peak heights vary noticeably along the propagation direction, demonstrating that the solution undergoes amplitude modulation during evolution. The dominant spikes

appearing near the central region suggest temporary amplification phenomena, while the smaller oscillatory structures observed away from these peaks indicate the persistence of weaker secondary wave components. The steep gradients around the principal maxima further imply rapid changes in the wave envelope and strong nonlinear behavior. The figure confirms that the obtained analytical solution corresponds to a dynamically modulated localized wave pattern characterized by intermittent high-amplitude structures and nonuniform propagation features.

Figure 6. The diagram of $|\Omega_6(x,t)|$ when $c = 1.2$, $q = 1$, $C_1 = 2$, $C_2 = 0.5$, $g_1 = -1$. The 3D representation of $|\Omega_6(x,t)|$ displays an extremely localized wave structure characterized by a sequence of sharply rising peaks concentrated within a narrow spatial region. Outside this interval, the amplitude remains close to zero, indicating that the wave energy is highly confined rather than broadly distributed across the domain. Such behavior is typical of strongly localized solutions generated through dominant nonlinear interactions. In addition, the peak magnitudes attain very large values, which suggests the occurrence of intense amplification phenomena under the selected parameter set. The repeated appearance of successive maxima indicates an oscillatory modulation superimposed on the localized structure, while the steep vertical gradients near each crest reflect rapid transitions in the solution profile. The absence of significant wave activity over the remaining domain further emphasizes the concentrated nature of the propagated wave packets. The figure verifies that the obtained analytical solution corresponds to a high-intensity localized wave pattern with recurrent sharp peaks, strong amplitude concentration, and highly nonlinear propagation characteristics.

Figure 7. The diagram for Eq.(1.8) when $w = 1$, $c = 0.5$, $D = 1$, $B = 15$, $C = 3$, $r_1 = 2$, $C_1 = 3$, $g_1 = 1.2$. The graphical profile corresponding to Eq.(1.8) presents a localized sequence of narrow high-amplitude peaks concentrated within a limited portion of the computational domain. These sharp

elevations indicate that the wave energy is confined to specific spatial-temporal regions, while the remaining area stays near negligible amplitude values. Such a distribution reflects the formation of strongly localized wave packets arising from the interaction of higher-order dispersive and nonlinear terms. Furthermore, the nearly regular spacing between successive peaks suggests a periodic modulation embedded within the localized structure. The comparable peak heights imply a relatively stable energy distribution during propagation, whereas the steep sides of the crests indicate rapid changes in the solution amplitude. Beyond the dominant peak region, the surface approaches the equilibrium level, confirming the decaying nature of the wave away from its principal localization zone. The figure demonstrates that the analytical solution associated with Eq.(1.8) exhibits coherent localized propagation characterized by repetitive high-intensity peaks, spatial confinement, and stable structural behavior.

Figure 8. The diagram of $|\Omega_7(x,t)|$ when $c = 1$, $w = 1.2$, $\alpha_2 = 5$, $\beta_2 = 10$, $\beta_1 = -1$, $g_0 = 1$, $C_1 = 0.5$, $g_1 = 1.2$. The 3D surface of $|\Omega_7(x,t)|$ exhibits a localized periodic wave pattern composed of successive narrow peaks distributed along the propagation direction. These repeated high-amplitude structures indicate that the corresponding analytical solution preserves an oscillatory character while remaining spatially confined to a limited region of the domain. The surrounding areas maintain comparatively small amplitude values, emphasizing the localized nature of the wave field. Moreover, the nearly uniform heights of the dominant peaks suggest a stable amplitude distribution during propagation, whereas the regular spacing between adjacent maxima reflects coherent periodic modulation. The steep gradients near each crest indicate rapid variations in the solution envelope, which are typically associated with strong nonlinear interactions. The gradual decay of the surface away from the principal peaks further confirms the concentration of wave energy around specific spatial-temporal locations. The figure verifies that the obtained

solution represents a coherent localized wave structure characterized by recurring sharp peaks, stable oscillatory behavior, and persistent propagation dynamics.

Figure 9. The diagram of $|\Omega_8(x,t)|$ when $y = 1.3$, $\varepsilon = 1$, $C_1 = 1$, $C_2 = -1$, $g_0 = 2$, $g_1 = 3$, $p = 0.5$, $q = 1$, $k_1 = 1$, $k_2 = 1.2$. The 3D graphical profile of $|\Omega_8(x,t)|$ demonstrates a highly regular periodic wave structure consisting of successive peaks and troughs distributed uniformly throughout the computational domain. The consistent repetition of these oscillatory patterns indicates that the corresponding analytical solution preserves its waveform during propagation and exhibits coherent dynamical behavior under the selected parameter configuration. The nearly constant peak heights further suggest that the amplitude remains stable, reflecting a balanced interaction between the dispersive and nonlinear components of the governing equation. In addition, the narrow spacing between adjacent maxima and minima implies a relatively high-frequency modulation process, while the sharp crest formations indicate rapid variations in the wave envelope. The absence of noticeable attenuation or distortion across the domain confirms the persistent nature of the obtained periodic structure. This graphical behavior is characteristic of stable travelling wave solutions with sustained oscillatory motion. The figure verifies that the derived solution associated with Eq.(3.45) possesses a coherent periodic propagation pattern characterized by structural regularity, stable amplitude distribution, and long-range wave persistence.

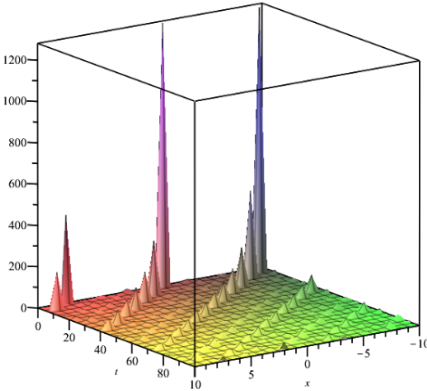


Figure 1. The 3D-plot of Eq.(3.7) for $|\Omega_1(x, t)|$.

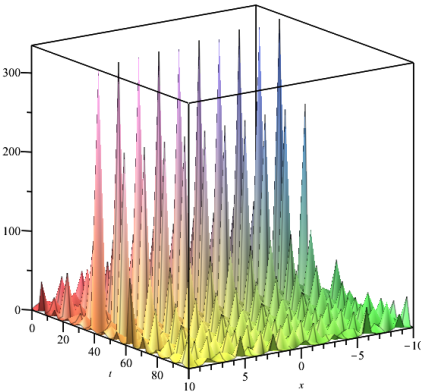


Figure 2. The 3D-plot of Eq.(3.14) for $|\Omega_2(x, t)|$.

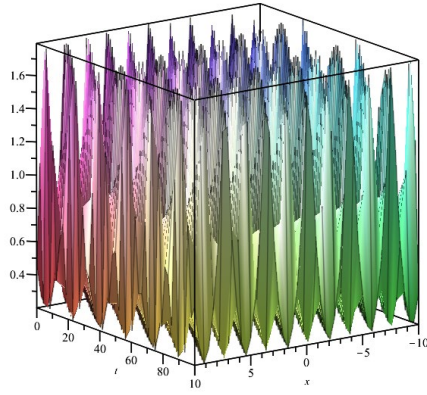


Figure 3. The 3D-plot of Eq.(3.20) for $|\Omega_3(x, t)|$.

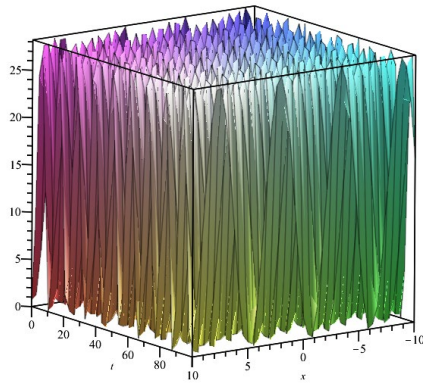


Figure 4. The 3D-plot of Eq.(3.26) for $|\Omega_4(x, t)|$.

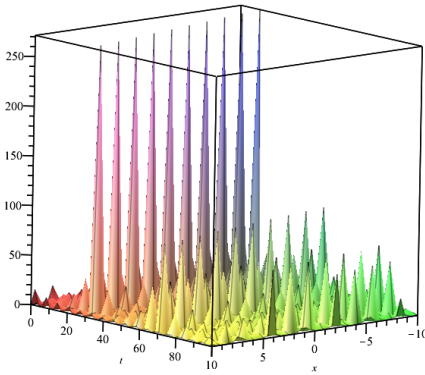


Figure 5. The 3D-plot of Eq.(3.32) for $|\Omega_5(x,t)|$.

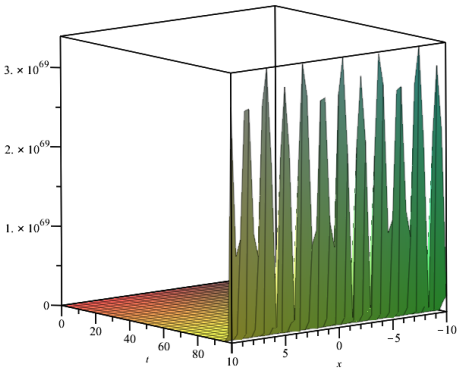


Figure 6. The 3D-plot of Eq.(3.38) for $|\Omega_6(x,t)|$.

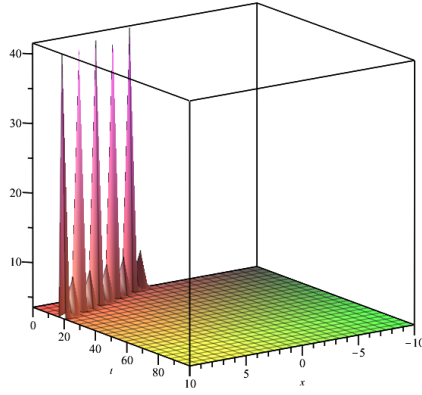


Figure 7. The 3D-plot of the solution for Eq.(1.8).

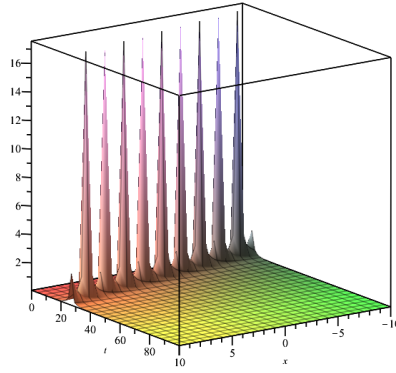


Figure 8. The 3D-plot of Eq.(3.49) for $|\Omega_7(x,t)|$.

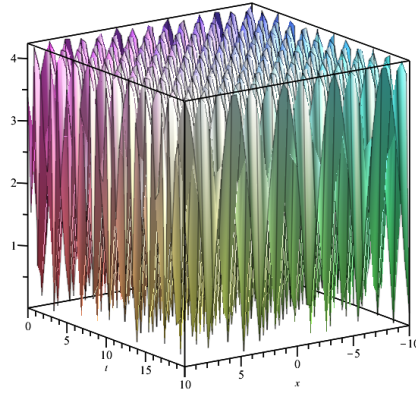


Figure 9. The 3D-plot of Eq.(3.55) for $|\Omega_g(x,t)|$.

5. CONCLUSION

In this study, travelling wave solutions of Schrödinger-type models with different potential functions were obtained by applying an ansatz-based method. The analytical expressions of the solutions were constructed in a systematic manner, and their physical profiles were illustrated through graphical representations. These solutions provide valuable insights into quantum mechanics, with potential applications in calculating atomic and molecular energy levels and analyzing quantum wave propagation under different potential settings. One of the main advantages of the adopted methodology is its simplicity and adaptability, allowing exact solutions to be obtained without relying on restrictive assumptions. The approach used here can therefore be applied to a broader class of NLPDEs beyond the Schrödinger framework, offering a versatile tool for further exploration of nonlinear wave phenomena. It should be noted that this study focused on Schrödinger-type equations with specific potential structures. Future research can expand this framework to more generalized forms or equations of higher complexity, which can reveal richer mathematical structures and varied solution behaviors.

Additionally, analyzing the stability of the obtained solutions would provide a better understanding of their physical significance. Overall, the findings presented in this study contribute to the analytical study of nonlinear Schrödinger-type equations. The results expand the perspective of existing exact solutions and demonstrate the effectiveness and applicability of ansatz-based approaches in mathematical physics and quantum theory.

Acknowledgment

The first author would like to thank to the Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TUBITAK) under the BİDEB 2211-A Domestic Ph.D. Scholarship Program for a research grant during her postgraduate study.

Conflict of Interest Statement

The authors have no competing interests to declare that are relevant to the content of this article.

Statement of Research and Publication Ethics

This study complies with research and publication ethics.

REFERENCES

- [1] M. Murata, “Asymptotic expansions in time for solutions of Schrödinger-type equations,” *J. Funct. Anal.*, vol. 49, no. 1, pp. 10–56, 1982.
- [2] C. K. Jones, *Instability of Standing Waves for Nonlinear Schrödinger Type Equations*. Providence, RI: Brown Univ., 1985.
- [3] S. I. Doi, “On the Cauchy problem for Schrödinger type equations and the regularity of the solutions,” *J. Math. Kyoto Univ.*, vol. 34, no. 2, pp. 319–328, 1994.
- [4] T. Cazenave, *Semilinear Schrödinger Equations*, vol. 10. Providence, RI: AMS, 2003.
- [5] C. Sulem and P. L. Sulem, *The Nonlinear Schrödinger Equation: Self-Focusing and Wave Collapse*. Springer, 2007.
- [6] V. A. Galaktionov, E. Mitidieri, and S. I. Pokhozhaev, *Blow-up for Higher-Order Parabolic, Hyperbolic, Dispersion and Schrödinger Equations*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
- [7] F. N. Kaya Sağlam, “Analytical Approaches to the Stochastic Nonlinear Kodama Equation via the Impact of Multiplicative Noise,” *Math. Methods Appl. Sci.*, 2025, doi: 10.1002/mma.70002.
- [8] B. Kopçasız, F. N. K. Sağlam, H. Emadifar, and K. K. Ahmed, “Exploration of soliton solutions of the nonlinear Kraenkel-Manna-Merle system using innovative methods in ferromagnetic materials,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, 27617, 2025.
- [9] F. N. K. Sağlam, B. Kopçasız, and M. Şenol, “Abundant new soliton solutions to the Arshed–Biswas equation,” *Mod. Phys. Lett. A*, vol. 40, no. 19–20, 2550054, 2025.
- [10] F. N. K. Sağlam, “Exploring the novel wave structures of the Kairat-X equation,” *Fundam. Contemp. Math. Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 218–234, 2025.
- [11] F. N. K. Sağlam, “Generation of solitary waves with analytical solution for the (3+1)-dimensional pKP–BKP equation,” *Bitlis Eren Univ. J. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 822–835, 2025.
- [12] F. N. Kaya Sağlam and B. Kopçasız, “Multi-wave, breather, and interaction solutions to Akbota equation for the Heisenberg ferromagnet-type model,” *Int. J. Appl. Comput. Math.*, vol. 11, no. 3, 107, 2025.

- [13] B. Kopçasız, “Qualitative analysis and optical soliton solutions galore: scrutinizing the $(2+1)$ -dimensional complex modified Korteweg–de Vries system,” *Nonlinear Dynamics*, vol. 112, no. 23, pp. 21321–21341, 2024.
- [14] Y. Çenesiz, D. Baleanu, A. Kurt, and O. Tasbozan, “New exact solutions of Burgers’ type equations with conformable derivative,” *Waves Random Complex Media*, vol. 27, no. 1, pp. 103–116, 2017.
- [15] O. Tasbozan, M. Şenol, A. Kurt, and O. Özkan, “New solutions of fractional Drinfeld-Sokolov-Wilson system,” *Ocean Eng.*, vol. 161, pp. 62–68, 2018.
- [16] V. Ala, “Examination of dark and bright solitons of $(2+1)$ -dimensional Kundu-Mukherjee-Naskar equation via unified solver technique,” *Sinop Univ. J. Sci.*, vol. 8, no. 1, pp. 65–74, 2023.
- [17] S. Malik, H. Almusawa, S. Kumar, A. M. Wazwaz, and M. S. Osman, “A $(2+1)$ -dimensional Kadomtsev–Petviashvili equation with competing dispersion effect,” *Results Phys.*, vol. 23, pp. 104043, 2021.
- [18] N. I. Okposo, P. Veerasha, and E. N. Okposo, “Solutions for time-fractional coupled nonlinear Schrödinger equations arising in optical solitons,” *Chin. J. Phys.*, vol. 77, pp. 965–984, 2022.
- [19] A. Jhangeer, A. R. Ansari, M. Imran, and M. B. Riaz, “Lie symmetry analysis and traveling wave patterns arising in the model of transmission lines,” *AIMS Math.*, vol. 9, no. 7, pp. 18013–18033, 2024.
- [20] Z. Pinar and H. Kocak, “Exact solutions for the third-order dispersive-Fisher equations,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 91, no. 1, pp. 421–426, 2018.
- [21] A. Ankiewicz, N. Devine, and N. Akhmediev, “Are rogue waves robust against perturbations?,” *Phys. Lett. A*, vol. 373, no. 43, pp. 3997–4000, 2009.
- [22] A. Ankiewicz, J. M. Soto-Crespo, M. A. Chowdhury, and N. Akhmediev, “Rogue waves in optical fibers in presence of third-order dispersion, self-steepening, and self-frequency shift,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 30, no. 1, pp. 87–94, 2013.
- [23] J. Chen and D. E. Pelinovsky, “Rogue waves on the background of periodic standing waves in the derivative nonlinear Schrödinger equation,” *Phys. Rev. E*, vol. 103, no. 6, pp. 062206, 2021.

- [24] M. Ozisik et al., “On the investigation of optical soliton solutions of cubic–quartic Fokas–Lenells and Schrödinger–Hirota equations,” *Optik*, vol. 272, 170389, 2023.
- [25] M. Ekici, M. Mirzazadeh, A. Sonmezoglu, M. Z. Ullah, M. Asma, Q. Zhou, S. P. Moshokoa, A. Biswas, and M. Belic, M., “Dispersive optical solitons with Schrödinger–Hirota equation by extended trial equation method,” *Optik*, vol. 136, pp. 451–461, 2017.
- [26] A. Ankiewicz, Y. Wang, S. Wabnitz, and N. Akhmediev, “Extended nonlinear Schrödinger equation with higher-order odd and even terms and its rogue wave solutions,” *Phys. Rev. E*, vol. 89, no. 1, 012907, 2014.
- [27] R. Hirota, “Exact envelope-soliton solutions of a nonlinear wave equation,” *J. Math. Phys.*, vol. 14, no. 7, p. 805, 1973.
- [28] D. Anderson and M. Lisak, “Nonlinear asymmetric self-phase modulation and self-steepening of pulses in long optical waveguides,” *Phys. Rev. A*, vol. 27, p. 1393, 1983.
- [29] S. Palacios, A. Guinea, J. M. Fernandez-Diaz, and R. D. Crespo, “Dark solitary waves in the nonlinear Schrödinger equation with third order dispersion, self-steepening, and self-frequency shift,” *Phys. Rev. E*, vol. 60, R45, 1999.
- [30] H. Q. Zhang and F. Chen, “Rogue waves for the fourth-order nonlinear Schrödinger equation on the periodic background,” *Chaos*, vol. 31, no. 2, 2021.
- [31] N. A. Kudryashov, “Almost general solution of the reduced higher-order nonlinear Schrödinger equation,” *Optik*, vol. 230, 166347, 2021.
- [32] S. T. R. Rizvi, A. R. Seadawy, K. Ali, M. A. Ashraf, and S. Althubiti, “Multiple lump and interaction solutions for fifth-order variable coefficient nonlinear-Schrödinger equation,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 54, no. 3, 154, 2022.
- [33] C. Zhao, Y. T. Gao, Z. Z. Lan, J. W. Yang, and C. Q. Su, “Bilinear forms and dark-soliton solutions for a fifth-order variable-coefficient nonlinear Schrödinger equation,” *Mod. Phys. Lett. B*, vol. 30, no. 24, 1650312, 2016.
- [34] N. A. Kudryashov, “Optical solitons of the Schrödinger–Hirota equation of the fourth order,” *Optik*, vol. 274, 170587, 2023.

- [35] E. M. Zayed, R. M. Shohib, A. Biswas, M. Ekici, A. S. Alshomrani, S. Khan, M. R. Belic, “Dispersive solitons in optical fibers and DWDM networks with Schrödinger–Hirota equation,” *Optik*, vol. 199, 163214, 2019.
- [36] L. Tang, “Bifurcations and dispersive optical solitons for the nonlinear Schrödinger–Hirota equation in DWDM networks,” *Optik*, vol. 262, 169276, 2022.
- [37] L. Tang, “Dynamical behavior and traveling wave solutions in optical fibers with Schrödinger–Hirota equation,” *Optik*, vol. 245, 167750, 2021.
- [38] E. M. Zayed, R. M. Shohib, M. E. Alngar, A. Biswas, L. Moraru, S. Khan, and M. R. Belic, “Dispersive optical solitons with Schrödinger–Hirota model having multiplicative white noise via Itô calculus,” *Phys. Lett. A*, vol. 445, 128268, 2022.
- [39] S. S. Ray, “Dispersive optical solitons of time-fractional Schrödinger–Hirota equation,” *Physica A*, vol. 537, 122619, 2020.
- [40] Y. Xie, Z. Yang, and L. Li, “New exact solutions to the highly dispersive cubic–quintic nonlinear Schrödinger equation,” *Phys. Lett. A*, vol. 382, no. 36, pp. 2506–2514, 2018.
- [41] W. X. Ma and M. Chen, “Direct search for exact solutions to the nonlinear Schrödinger equation,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 215, no. 8, pp. 2835–2842, 2009.
- [42] Z. Li, L. Li, H. Tian, and G. Zhou, “New types of solitary wave solutions for the higher order nonlinear Schrödinger equation,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 18, p. 4096, 2000.
- [43] F. Azzouzi, H. Triki, K. Mezghiche, and A. El Akrmi, “Solitary wave solutions for high dispersive cubic–quintic nonlinear Schrödinger equation,” *Chaos Solitons Fractals*, vol. 39, no. 3, pp. 1304–1307, 2009.
- [44] A. Neirameh, “Functional variable method to the chiral nonlinear Schrödinger equation,” *TWMS J. Appl. Eng. Math.*, vol. 13, no. 1, pp. 225–231, 2023.
- [45] H. Esen, N. Ozdemir, A. Secer, M. Bayram, T. A. Sulaiman, and A. Yusuf, “Solitary wave solutions of chiral nonlinear Schrödinger equations,” *Mod. Phys. Lett. B*, vol. 35, no. 30, 2150472, 2021.

- [46] M. Younis, N. Cheemaa, S. A. Mahmood, and S. T. Rizvi, “On optical solitons: the chiral nonlinear Schrödinger equation with perturbation and Bohm potential,” *Opt. Quantum Electron.*, vol. 48, pp. 1–14, 2016.
- [47] H. Ur Rehman, M. A. Imran, M. Bibi, M. Riaz, and A. Akgül, “New soliton solutions of the 2D-chiral nonlinear Schrödinger equation,” *Math. Methods Appl. Sci.*, vol. 44, no. 7, pp. 5663–5682, 2021.
- [48] K. U. Tariq, A. M. Wazwaz, and S. R. Kazmi, “On the dynamics of the (2+1)-dimensional chiral nonlinear Schrödinger model,” *Optik*, vol. 285, 170943, 2023.

CHAPTER 8

SURFACE FUNCTIONALIZATION OF 3D-PRINTED LATTICE SCAFFOLDS VIA CHITOSAN COATING: PROCESSING, MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION, AND COMPOSITIONAL ANALYSIS

PhD Özgün Ceren AKBAY¹

Lecturer Mustafa Ercan GÜNDÜZ²

Assoc. Prof. Dr. Erkan BAHÇE³

¹ Inonu University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Malatya Türkiye. ceren.akbay@gmail.com, orcid id: 0000-0002-7839-2484

² Inonu University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering., Malatya Türkiye. erkan.bahce@inonu.edu.tr, orcid id: 0000-0001-5389-5571

³ İnönü University, Malatya OSB Vocational School, Department of Electricity and Energy, Malatya Türkiye. mustafaercan.gunduz@inonu.edu.tr, orcid id: 0000-0002-8443-6340

INTRODUCTION

Chitosan coating has emerged as an effective surface modification strategy for biomaterials because it combines biocompatibility, biodegradability, antimicrobial activity, and a high density of reactive amino groups that can promote interfacial bonding and biological interactions (Rinaudo, 2006; Dutta et al., 2004; Croisier & Jérôme, 2013). Owing to these properties, chitosan has been widely investigated for scaffold functionalization in tissue engineering, wound healing, drug delivery, and implant surface engineering, where improvement of cell attachment, surface bioactivity, and local antibacterial performance is often required (Ding et al., 2014; Venkatesan & Kim, 2010).

In porous and additively manufactured scaffolds, surface coating is particularly important because the biological response is governed not only by the bulk material but also by the chemistry and topography of the exposed strut surfaces. In this context, chitosan is especially attractive since it can be deposited by relatively simple wet-coating routes, such as dip-coating, while also providing a biofunctional interface capable of interacting with proteins, mammalian cells, and microorganisms (Croisier & Jérôme, 2013; Rinaudo, 2006). Once deposited on a lattice structure, chitosan may improve wettability, support early-stage cell attachment, and provide a platform for further incorporation of bioactive molecules or antimicrobial agents (Jayakumar et al., 2011; Cheung et al., 2015).

In the present study, the lattice structures were fabricated by MSLA printing, and the values 5, 10, and 15 refer to the cellulose amount incorporated into the printed lattice formulations. This distinction is important because cellulose content is expected to influence not only the internal composition of the scaffolds but also their surface characteristics after fabrication. As the cellulose amount increases, the surface may become relatively more irregular and rough due to the heterogeneous distribution of the cellulose-containing phase and the resulting microtopographical variations. Such an increase in roughness can be advantageous for coating retention, because a rougher surface provides more anchoring points, a larger effective surface area, and stronger mechanical interlocking for the deposited chitosan layer (Hsu et al., 2026). Accordingly, the cellulose-rich lattice surfaces may offer a more favorable substrate for stable chitosan attachment,

especially in complex porous architectures where coating continuity depends strongly on local surface texture and capillary infiltration behavior.

This relationship between surface roughness and coating adhesion is consistent with the broader biomaterials literature, where moderate increases in micro- and submicron-scale roughness are often associated with improved coating stability, enhanced interfacial contact, and more effective retention of polymeric surface layers. For lattice-based scaffolds, this effect is particularly relevant because open porosity and repeating strut geometry already create a high-surface-area framework; when such a framework is further modified by cellulose-related roughening, the deposited chitosan can adhere more effectively to both outer and inner regions of the structure. As a result, the final coating behavior depends not only on the chitosan solution parameters but also on the printed scaffold composition and the topographical condition generated by the cellulose content. From an application perspective, the combination of MSLA-fabricated lattice architectures, cellulose-containing formulations, and chitosan coating is promising for biomedical scaffold development. The lattice design provides controlled porosity and interconnected channels, the cellulose contribution may improve surface texture and coating receptivity, and the chitosan layer introduces a biologically active interface with potential antimicrobial and cell-supportive functionality. Therefore, understanding how cellulose amount affects coating deposition and surface chemistry is essential for optimizing scaffold performance.

The surface analytical findings support this interpretation. According to the EDX elemental composition data, carbon and oxygen were the dominant elements in all scaffold groups, while nitrogen was detected in all series, which is consistent with the presence of chitosan on the coated surfaces because the amino groups of chitosan contribute to the nitrogen signal. At the same time, the nitrogen content did not show a strictly monotonic increase with increasing cellulose amount across all architectures; instead, it varied depending on both lattice design and local surface condition. This suggests that chitosan deposition was influenced not only by composition but also by architecture-dependent coating distribution, local roughness, and the heterogeneous nature of the coated porous surfaces. In addition, the measurable Na and Cl contents indicate residual ionic species associated with

the coating and post-treatment steps. Overall, the EDX results, together with the expected roughness increase caused by higher cellulose content, indicate that the coating process was successfully achieved on all scaffold types, while the extent and uniformity of chitosan retention were affected by both cellulose amount and lattice architecture.

Material and Method

Chitosan Coating Procedure

To improve the biocompatibility of the fabricated lattice grafts and to impart antibacterial functionality, a chitosan coating was applied. Chitosan is a natural polysaccharide obtained by the deacetylation of chitin and is widely recognized for its biocompatible, biodegradable, and antibacterial properties (Iber et al., 2022). Previous studies have also shown that chitosan can support cell adhesion, proliferation, and mineral formation in tissue engineering applications (Ressler, 2022; Abinaya et al., 2019; Akbay et al., 2026).

In this study, the chitosan coating was applied using the dip-coating method. This technique was preferred because it enables relatively uniform coating of both the external surfaces and the internal pore walls of grafts with complex geometries. The chitosan coating solution was prepared by dissolving medium-molecular-weight chitosan powder (degree of deacetylation $\geq 75\%$, Sigma-Aldrich) at a concentration of 1.5% (w/v) in 1% (v/v) acetic acid solution. First, a 1% (v/v) acetic acid solution was prepared in distilled water. Then, chitosan powder was added gradually, and the mixture was stirred on a magnetic stirrer at room temperature for 24 h at 300 rpm until a homogeneous and viscous solution was obtained. The use of 1% (v/v) acetic acid was considered appropriate because it ensures complete dissolution of chitosan while maintaining the viscosity of the solution within a suitable range for coating applications (Ramli et al., 2023).

Before coating, the fabricated lattice grafts were subjected to a cleaning procedure. The grafts were first washed in 70% ethanol for 15 min in an ultrasonic cleaner to remove residual resin or surface contaminants. They were then rinsed three times with distilled water to eliminate ethanol residues. After cleaning, the lattice grafts were dried in an oven at 40°C for 2 h under sterile conditions to prepare them for coating.

For the coating step, the lattice grafts were completely immersed in the chitosan solution and kept at room temperature for 30 min. During this period, the chitosan solution was allowed to penetrate the pore network and adsorb onto the surface of the structures. At the end of the immersion period, the grafts were slowly removed from the solution and placed in a sterile container for 10 min to allow excess solution to drain.

In the final stage, the coated lattice grafts were gently rinsed with distilled water to remove excessive acid and loosely bound chitosan residues from the surface. To bring the pH of the chitosan-coated grafts closer to physiological values and to stabilize the coating layer, a neutralization step was carried out. For this purpose, the grafts were immersed in 0.1 M NaOH solution for 10 min, which enabled neutralization of the chitosan layer (Chang et al., 2019). After neutralization, the samples were washed three times with phosphate-buffered saline (PBS) to remove alkaline residues and to achieve near-physiological pH conditions. Each washing step lasted 10 min.

A two-step drying procedure was then applied to the chitosan-coated lattice grafts. In the first step, the samples were air-dried under sterile conditions at room temperature for 24 h. This slow and controlled drying stage was intended to reduce the risk of crack formation during solidification of the coating. In the second step, the grafts were dried in a vacuum oven at 40°C for 12 h to ensure complete drying and to minimize residual moisture content. After drying, the coated lattice grafts were stored in sterile petri dishes until characterization (Figure 1).

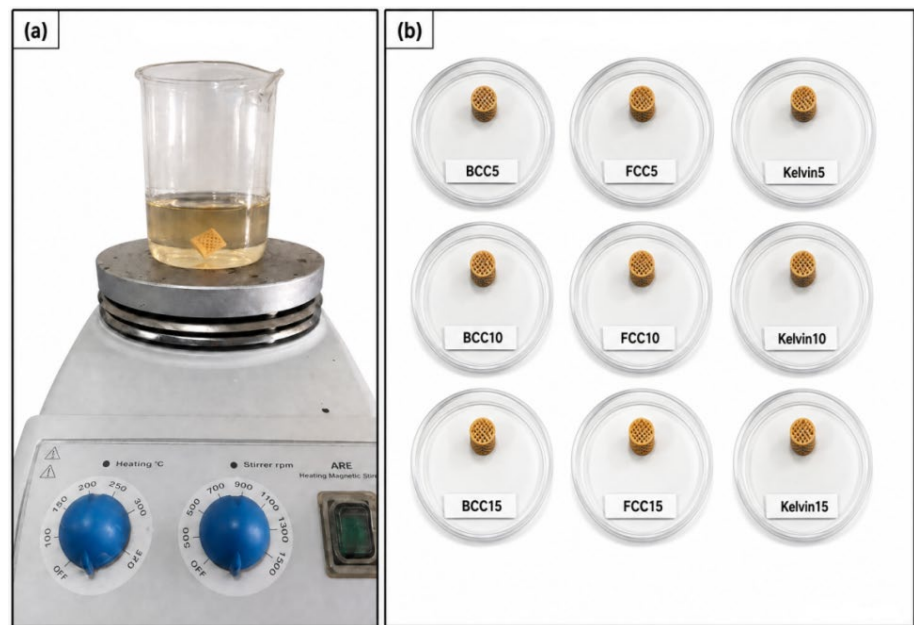


Figure 1. Coating Process a) Dip-coating setup b) Chitosan coated lattice grafts in petri dishes.

The presence of the chitosan coating was evaluated by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), whereas surface morphology was assessed by scanning electron microscopy (SEM). All coating procedures were performed under sterile conditions to minimize the risk of contamination.

Results and Discussion

Figure 2 presents the overall post-coating evaluation of the MSLA-fabricated lattice grafts through a combined morphological consisting of (a) SEM micrographs and (b) EDX elemental composition graphs for the full 9-sample set. The evaluated groups include BCC, FCC, and Kelvin unit-cell geometries with cellulose amounts of 5, 10, and 15. This figure serves to correlate surface morphology with elemental data to assess coating continuity and the presence of chitosan across all graft surfaces.

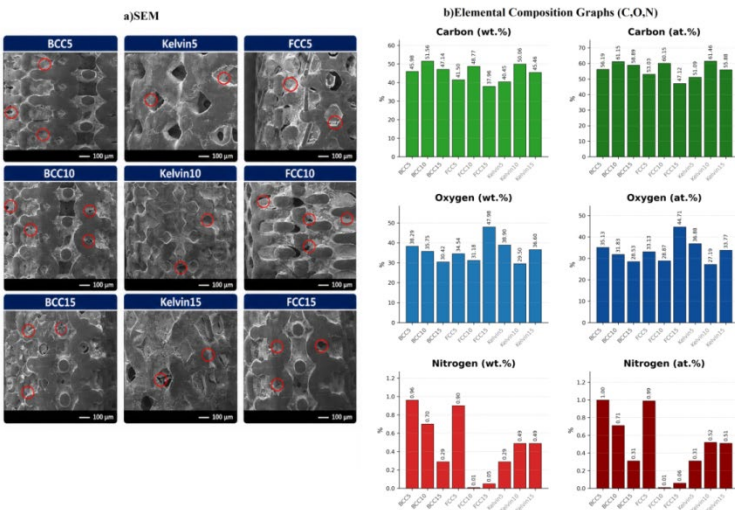


Figure 2. Post-coating characterization of MSLA-fabricated BCC, FCC, and Kelvin lattice structures: (a) SEM micrographs showing surface morphology and coating continuity; (b) EDX elemental composition graphs showing C, O and N concentrations for samples with different cellulose amounts (5, 10, 15).

Figure 2 (a) shows the SEM-based surface morphology after the coating process. According to the SEM observations, the chitosan layer is visible on the strut surfaces in all three geometries, though local characteristics vary according to unit-cell topology and cellulose content. In the 5 cellulose groups, the coated surfaces generally exhibit a more continuous and smoother appearance. Specifically, the BCC5 group shows a continuous coating sheath along its linear struts, while FCC5 exhibits local thickening at junctions without pore blockage. Kelvin5 samples involve a thin, inner-pore surface layer of chitosan.

As the cellulose amount increases to 10 and 15, the SEM images indicate a significant change in surface topography. The struts display a more pronounced micro-scale roughness and irregularity. This morphological shift is directly associated with the increased cellulose reinforcement; the rougher surface likely promotes stronger physical retention and mechanical interlocking of the chitosan layer. This interpretation is consistent with previous literature suggesting that cellulose content influences the surface roughness and adhesion properties of polymeric composites (Gupta et al., 2007; Felix et al., 1993). In particular, the Kelvin15 and BCC15 groups show

the most heterogeneous and thickest coating regions, suggesting that higher cellulose levels create a more favorable surface for coating attachment. Throughout all groups, SEM images confirm that the pore network remains open, which is critical for the intended biological functionality of the lattice grafts.

Figure 2 (b) shows the EDX elemental composition graphs, providing a quantitative summary of C, O, N, Na, and Cl levels for each sample. Carbon and oxygen remain the dominant elements, reflecting the polymeric and cellulosic nature of the composite scaffolds. However, the presence of nitrogen (N) is the primary elemental indicator for the chitosan coating. Nitrogen was detected at varying but measurable levels across nearly all series, providing supporting evidence for the chitosan amino groups on the surface. For instance, nitrogen values varied from 0.96 wt.% in BCC5 to 0.49 wt.% in Kelvin15, while the FCC series (FCC10 and FCC15) showed values as low as 0.01-0.05 wt.%.

These EDX results should be interpreted with caution. Because EDX is a surface-sensitive and localized analysis, a low nitrogen signal in specific measurements does not necessarily imply a complete absence of the coating. Factors such as local coating thickness, surface roughness, and the challenges associated with detecting light (low-Z) elements can significantly influence the recorded intensities. This perspective aligns with findings in the literature stating that EDX detection of organic coatings like chitosan can be region-dependent and influenced by the underlying topography (Caicedo et al., 2020; Jia et al., 2020).

When (a) and (b) are interpreted together, Figure 2 confirms that the chitosan coating was successfully applied to the full 9-sample set. The SEM micrographs demonstrate morphological continuity and surface retention, while the EDX graphs provide elemental support for the successful integration of the chitosan layer. Overall, the findings suggest that while the coating process is effective across all groups, the final distribution and elemental visibility are governed by the interplay between lattice geometry and cellulose-induced surface roughness.

Conclusion

This study successfully shows that a stabilized chitosan layer can be effectively deposited onto varied lattice geometries (BCC, FCC, and Kelvin) through a systematic dip-coating and neutralization process, while maintaining the essential open-pore interconnectivity required for biological functionality.

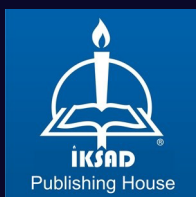
Surface characterization reveals that the interfacial stability and topographical characteristics of the coating are fundamentally governed by the interplay between cellulose concentration and lattice architecture. A clear correlation was observed between higher cellulose content (10–15 wt.%) and increased micro-topographical irregularity, which appears to facilitate superior coating retention via mechanical interlocking and increased surface area. While SEM micrographs confirmed morphological continuity across the strut surfaces, EDX elemental analysis provided quantitative verification of chitosan presence through the detection of nitrogen signals. The variations in nitrogen concentration across different groups suggest that the architecture dependent local surface roughness significantly influence the local density and distribution of the deposited chitosan layer.

In conclusion, these findings underscore that the efficacy of surface modification in complex porous structures is not solely dependent on the coating parameters, but is also a function of the substrate's intrinsic material composition and geometry. The successful fabrication and characterization of these bioactive, cellulose-chitosan composite scaffolds provide a robust foundation for future investigations into their antimicrobial efficacy, osteoconductive potential, and localized drug delivery capabilities in bone tissue engineering applications.

References

- Abinaya, B., Prasith, T. P., Ashwin, B., Viji Chandran, S., & Selvamurugan, N. (2019). Chitosan in surface modification for bone tissue engineering applications. *Biotechnology Journal*, 14(12), 1900171.
- Akbay, Ö. C., Bahçe, E., Gürses, C., & Köytepe, S. (2026). 3D printed biocompatible functionally graded cellulose-reinforced polymer scaffolds with varying unit cell architectures: evaluation of L-929 cell proliferation and morphology. *Journal of Polymer Research*, 33(4), 168.
- Caicedo, J. C., Caicedo, H. H., & Ramirez-Malule, H. (2020). Structural and chemical study of β -Tricalcium phosphate-chitosan coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 240, 122251.
- Chang, W., Liu, F., Sharif, H. R., Huang, Z., Goff, H. D., & Zhong, F. (2019). Preparation of chitosan films by neutralization for improving their preservation effects on chilled meat. *Food Hydrocolloids*, 90, 50-61.
- Cheung, R. C. F., Ng, T. B., Wong, J. H., & Chan, W. Y. (2015). Chitosan: an update on potential biomedical and pharmaceutical applications. *Marine Drugs*, 13(8), 5156-5186.
- Croisier, F., & Jérôme, C. (2013). Chitosan-based biomaterials for tissue engineering. *European Polymer Journal*, 49(4), 780-792.
- Ding, F., Deng, H., Du, Y., Shi, X., & Wang, Q. (2014). Emerging chitin and chitosan nanofibrous materials for biomedical applications. *Nanoscale*, 6(16), 9477-9493.
- Dutta, P. K., Dutta, J., & Tripathi, V. S. (2004). Chitin and chitosan: Chemistry, properties and applications. *Journal Of Scientific and Industrial Research*, 63(1), 20-31.
- Felix, J. M., Gatenholm, P., & Schreiber, H. P. (1993). Controlled interactions in cellulose-polymer composites. 1: effect on mechanical properties. *Polymer Composites*, 14(6), 449-457.
- Gupta, B. S., Reiniati, I., & Laborie, M. P. G. (2007). Surface properties and adhesion of wood fiber reinforced thermoplastic composites. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 302(1-3), 388-395.
- Hsu, C. Y., Abdulkareem, R., Hjazi, A., Baldaniya, L., Roopashree, R., Abbot, V., ... & Bathaei, M. S. (2026). Chitosan hydrogel coatings on

- Ti-6Al-4V alloy for sustained drug release and corrosion protection in simulated inflammatory and acute inflammatory environments. *Materials Today Communications*, 115390.
- Iber, B. T., Kasan, N. A., Torsabo, D., & Omuwa, J. W. (2022). A review of various sources of chitin and chitosan in nature. *Journal of Renewable Materials*, 10(4), 1097.
- Jayakumar, R., Prabakaran, M., Kumar, P. S., Nair, S. V., & Tamura, H. J. B. A. (2011). Biomaterials based on chitin and chitosan in wound dressing applications. *Biotechnology Advances*, 29(3), 322-337.
- Jia, Z., Yang, C., Zhao, F., Chao, X., Li, Y., & Xing, H. (2020). One-step reinforcement and deacidification of paper documents: Application of Lewis base—Chitosan nanoparticle coatings and analytical characterization. *Coatings*, 10(12), 1226.
- Ramli, N. H., Jamaluddin, N. S. N., Rahim, S. N. A., Kasmuri, N., & Ismail, A. F. H. (2023). Characteristic and stability of chitosan-based polymer for fruit coating in the presence of ginger essential oil: Effect of acetic acid concentration. *Chemical Engineering Transactions*, 106, 115-120.
- Ressler, A. (2022). Chitosan-based biomaterials for bone tissue engineering applications: a short review. *Polymers*, 14(16), 3430.
- Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress In Polymer Science*, 31(7), 603-632.
- Venkatesan, J., & Kim, S. K. (2010). Chitosan composites for bone tissue engineering—an overview. *Marine Drugs*, 8(8), 2252-2266.



ISBN:978-625-378-678-6